



Miguel Alexandre Nunes das Neves Teixeira

Licenciado em Ciências da Engenharia Civil

Argamassas de reboco com terra

Avaliação da suscetibilidade à contaminação biológica

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em

Engenharia Civil – Perfil de Construção

Orientadora: Maria Paulina Faria Rodrigues, Professora Associada da Faculdade de Ciências e Tecnologias, da Universidade Nova de Lisboa

Co-orientadora: Lina Maria Ribeiro Nunes, Investigadora Auxiliar do Laboratório Nacional de Engenharia Civil

Júri:

Presidente: Doutor Mário Jorge Vicente da Silva

Arguente: Doutora Maria Idália da Silva Gomes

Vogal: Doutor Luís Gonçalo Correia Baltazar

Vogal: Doutora Lina Maria Ribeiro Nunes



FACULDADE DE
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

Novembro 2014

“Copyright” Miguel Alexandre Nunes das Neves Teixeira, FCT/UNL e UNL

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objetivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

Agradecimentos

Concluída esta importante etapa da minha vida, quero agradecer a todos aqueles que de alguma maneira contribuíram para o meu percurso pessoal e académico.

Em primeiro lugar gostaria de deixar um agradecimento especial às minhas orientadoras Professora Doutora Paulina Faria e Doutora Lina Nunes, pela disponibilidade, orientação, e simpatia. Uma enorme partilha de conhecimentos que me proporcionou esta experiência enriquecedora.

Agradeço ao Engenheiro Vítor Silva o acompanhamento na realização dos ensaios experimentais, o contributo no esclarecimento de dúvidas e à Sandra Sousa a ajuda na realização dos ensaios de contaminação biológica.

À Tânia Santos agradeço a ajuda prestada em alguns ensaios da campanha experimental.

Deixo também um agradecimento à Doutora Teresa Gonçalves pela sua disponibilidade, apesar das dificuldades logísticas e pela disponibilização dos equipamentos necessários à realização dos ensaios de medição de rugosidade realizados no LNEC.

Um agradecimento a Joachim Reinecke, da empresa EMBARRO, pela disponibilização das argamassas pré-doseadas de terra e pelos constituintes das argamassas formuladas em laboratório.

Quero ainda agradecer a todos os meus amigos que me acompanharam ao longo do meu percurso académico, estando certo que sabem quem são.

Pela paciência, carinho, compreensão, amizade e ainda por todos os conselhos que me ajudaram a seguir o rumo certo, deixo um agradecimento especial à Carla Veiga.

Por último mas não menos importante, um agradecimento à minha família, em especial aos meus pais, pelo apoio e confiança transmitidos. Sem eles e sem a sua orientação teria sido possível atingir este objetivo nem seria a pessoa que hoje sou.

Resumo

Em tempos passados, em Portugal, as argamassas de cal aérea, de terra e mistas de cal e terra foram muito utilizadas na construção de edifícios. Foram aplicadas na realização de rebocos, exteriores e interiores, de betonilhas e no assentamento de alvenarias. Com o aparecimento de novos ligantes, como o cimento, a sua utilização reduziu-se drasticamente levando à perda de muitos conhecimentos sobre a sua correta formulação, produção, manuseamento e utilização. Com o aumento das preocupações ecológicas e com a necessidade de reabilitar edifícios antigos têm vindo a ser estudados diversas características destas argamassas de modo a tornar a sua utilização de novo corrente.

A presente dissertação tem como objetivo estudar uma característica pouco analisada no que diz respeito a argamassas de cal e de terra: a suscetibilidade à contaminação biológica quando aplicadas em rebocos. Para tal, foram analisadas ainda outras propriedades das argamassas como o pH e a rugosidade. Realizou-se um estudo preliminar sobre argamassas de cal aérea, cal e terra e fibras vegetais. Posteriormente o estudo incidiu sobre uma argamassa pré-doseada de terra e diversas argamassas elaboradas em laboratório com diferentes areias e adições (fibras vegetais e material de mudança de fase), de modo a ser possível determinar a influência de cada constituinte no risco de contaminação por fungos.

Os resultados dos ensaios revelam que as argamassas de terra são bastante suscetíveis à contaminação biológica, sendo que o risco é agravado com a introdução de fibras e materiais de mudança de fase. Foi também possível concluir que a presença de cal inibe o desenvolvimento de fungos, apesar da presença de fibras numa argamassa de cal também aumentar o risco de contaminação. Conclui-se que a rugosidade e o pH são fatores muito importantes para controlar o nível de colonização. Foi ainda possível observar que diferentes composições levam a diferentes resultados e que é necessário estudar as características que se pretendem para uma determinada argamassa de modo a otimizá-la.

Termos chave: reboco, argamassa, terra, cal aérea, fibra vegetal, PCM, contaminação biológica

Abstract

In previous times, in Portugal, air lime mortars but also earth and mixed lime and earth mortars have been widely used in building construction, and were applied in making renders and plasters, screeds and laying masonry. With the emergence of new binders, such as cement, its use was drastically reduced leading to the loss of much knowledge about its correct formulation, production, handling and use. With the increasing of environmental concerns and the need for rehabilitating older buildings, various characteristics of these mortars are being studied in order to make its use more common.

This thesis aims to study a little feature not commonly analysed with regard to earth and lime mortars: its susceptibility to biological contamination when applied in plasters. In this regard were also further considered the mortar properties such as pH and roughness. A preliminary study was conducted on mortars with air lime, earth and vegetal fibers. Subsequently, the study focused on a pre-dosed earth mortar and on mortars prepared in the laboratory with addition of different sand and additions (vegetal fibers and phase changing material), in order to make possible to determine the influence of each constituent in the risk of contamination by fungus.

The test results show that the earth mortars are quite susceptible to biological contamination, and the risk is compounded with the introduction of fibers and the phase changing material. It was also concluded that the presence of lime inhibits fungal growth. The presence of fibers in a mortar also increases the risk of contamination. It was concluded that the roughness and pH are very important factors to control the level of colonization. It was also observed that different compositions lead to different results and that it is necessary to study the features that are intended for a particular mortar in order to optimize it.

Keywords: plaster, mortar, earth, air lime, vegetal fiber, PCM, biological contamination

Simbologia

Abreviaturas

ASTM - American Society for Testing and Materials

CEN – Comité Européen de Normalisation

DEC – Departamento de Engenharia Civil

DIN – Deutsches Institut für Normung

EN – European Norm

FCT-UNL – Faculdade de Ciências e Tecnologias da Universidade Nova de Lisboa

IPQ – Instituto Português da Qualidade, I.P.

LNEC – Laboratório Nacional de Engenharia Civil

NP – Norma Portuguesa

PCM – Material de mudança de fase (Phase change material)

Argamassas

CL2 – Argamassa de cal aérea com base no traço volumétrico 1:2 (cal: areia), com 20% (vol. total) de água

CL2-25t – Argamassa com base no traço volumétrico 1:2 (cal: areia), com 25% da massa de cal aérea substituída por terra e com 20% (vol. total) de água

CL2-25t+9ca - Argamassa com base no traço volumétrico 1:2 (cal: areia), com 25% da massa de cal aérea substituída por terra, com adição de 9% de casca de arroz (face à massa de cal) e com 23% (vol. total) de água

CL2-25t+5cc - Argamassa com base no traço volumétrico 1:2 (cal: areia), com 25% da massa de cal aérea substituída por terra, com adição de 5% de crina de cavalo (face à massa de cal) e com 23% (vol. total) de água

CL2-25t+2rl - Argamassa com base no traço volumétrico 1:2 (cal: areia), com 25% da massa de cal aérea substituída por terra, com adição de 2% de resíduo de lã (face à massa de cal) e com 26% (vol. total) de água

CS_PCM20 – Argamassa de terra com base no traço vol. 1:3 (terra: areia grossa), com 20% do volume de areia grossa substituído por PCM e 17% (vol. total) de água

CS30_FS45 – Argamassa de terra ao traço vol. 1:3 (terra: agregado) em que 30% é areia grossa e 45% é areia fina, com 20% (vol. total) de água

CS30_FS25_PCM20 – Argamassa com base no traço vol. 1:3 (terra: agregado) em que 30% é areia grossa, 25% é areia fina e 20% é PCM, com 20% (vol. total) de água

CS30_FS15_PCM30 – Argamassa com traço vol. 1:3 (terra: agregado) em que 30% é areia grossa, 15% é areia fina e 30% é PCM, com 20% (vol. total) de água

CS30_FS15_PCM30+CL5 – Argamassa com traço vol. 1:3 (terra: agregado) em que 30% é areia grossa, 15% é areia fina e 30% é PCM, com adição de 5% de cal aérea (vol. total) e com 20% (vol. total) de água

CS30_FS45+F5 – Argamassa com traço vol. de 1:3 (terra: agregado) em que 30% é areia grossa e 45% é areia fina, com 5% do volume total de fibras, com 25% (vol. total) de água

CS30_FS45+F5+CL5 – Argamassa com traço vol. de 1:3 (terra: agregado) em que 30% é areia grossa e 45% é areia fina, com 5% do volume total de fibras, com adição de 5% de cal aérea (vol. total) e com 25% (vol. total) de água

FS – Argamassa com traço vol. de 1:3 (terra: areia fina) e com 20% (vol. total) de água

FS_PCM20 – Argamassa com base no traço vol. 1:3 (terra: areia fina), com 20% do volume de areia fina substituída por PCM e com 20% (vol. total) de água

P – Argamassa pré-doseada (com fibras e areia fina) com 20% (vol. total) de água

Ensaio e determinações

CC – Coeficiente de capilaridade

DP – Desvio padrão

Ed – Módulo de elasticidade dinâmico

HR – Humidade Relativa

IS – Índice de Secagem

MV – Massa volúmica (estado fresco)

MV_{aparente} – Massa volúmica aparente (estado endurecido)

Pab – Porosidade aberta

Rc – Resistência à compressão

Rt – Resistência à tração por flexão

TS – Taxa de secagem

VA – Valor assintótico (absorção capilar)

Wt – Teor de água

λ – Condutibilidade térmica

Índice de Texto

1. Introdução.....	1
1.1. Enquadramento geral	1
1.2. Objetivos e metodologia	1
1.3. Estrutura de trabalho	2
2. Considerações gerais sobre argamassas	5
2.1. Definição e classificação de argamassas.....	5
2.2. Argamassas de reboco.....	6
2.2.1. Definição e características	6
2.2.2. Argamassas de cais.....	6
2.2.3. Argamassas de terra.....	8
2.2.4. Argamassas de cal e terra	9
2.2.5. Argamassas com fibras naturais	10
2.2.6. Argamassas com PCM	11
3. Contaminação Biológica	15
3.1. Fatores condicionantes.....	15
3.1.1. Avaliação da rugosidade.....	16
3.1.2. Caracterização do pH de argamassas de diferentes ligantes.....	17
4. Campanha experimental	21
4.1. Introdução	21
4.2. Fase preliminar de ensaios de contaminação biológica	21
4.2.1. Composição e amassadura.....	23
4.2.2. Ensaio de contaminação biológica	24
4.3. Fase 1 de ensaios.....	28
4.3.1. Composição e amassadura.....	28
4.3.2. Ensaio de rugosidade	30
4.3.3. Ensaio de medição de pH	34
4.3.4. Ensaio de contaminação biológica	35
4.4. Fase 2 de ensaios.....	37
4.4.1. Composição e amassadura.....	38
4.4.2. Ensaios às argamassas no estado fresco	38
4.4.2.1. Consistência por espalhamento	38
4.4.2.2. Massa volúmica fresca.....	40
4.4.3. Ensaios às argamassas no estado endurecido	40
4.4.3.1. Condutibilidade térmica	41

4.4.3.2.	Massa volúmica aparente.....	42
4.4.3.3.	Módulo de elasticidade dinâmico	43
4.4.3.4.	Resistências à tração por flexão e à compressão	44
4.4.3.5.	Absorção de água por capilaridade.....	46
4.4.3.6.	Secagem.....	49
4.4.3.7.	Porosimetria de mercúrio.....	52
4.4.3.8.	Medição de pH	54
4.4.3.9.	Ensaio de rugosidade.....	55
4.4.3.10.	Ensaio de contaminação biológica	57
5.	Discussão de Resultados	61
5.1.	Fase preliminar	61
5.2.	Fase 1 de ensaios.....	63
5.3.	Fase 2 de ensaios.....	66
6.	Conclusões	75
6.1.	Considerações finais	75
6.2.	Propostas de desenvolvimentos futuros	77
	Bibliografia	79
	Anexos	87
A.1	– Caracterização dos materiais utilizados	87
A.2	– Ficha técnica do PCM.....	89
A.3	– Resultados experimentais obtidos nos ensaios preliminares.....	90
A.4	– Resultados experimentais obtidos na fase 1 de ensaios	91
A.5	– Resultados experimentais obtidos na fase 2 de ensaios	94
A.6	– Resultados obtidos por Pedro Santos (2014) e Tânia Santos (2014)	99
A.7	– Artigo realizado no âmbito da conferência “Argamassas 2014”	101

Índice de Figuras

Figura 2.1 - Classificação dos PCM.....	12
Figura 3.1 - Valores de pH para argamassas com principais ligantes	18
Figura 3.2 - Valores de pH de argamassas diversas	19
Figura 4.1 - Alguns provetes no ensaio de contaminação biológica	26
Figura 4.2 - Resultados dos ensaios de contaminação.....	27
Figura 4.3 - Provetes CL2-25t+2rl e CL2-25t+5cc após ensaio.....	28
Figura 4.4 - Molde utilizado para produção de fiadas de 5 provetes.....	30
Figura 4.5 - Altura média da superfície.....	31
Figura 4.6 - Altura máxima da superfície.....	32
Figura 4.7 - Superfície de um provete da argamassa CS30_FS45 em 2D.....	33
Figura 4.8 - Superfície de um provete da argamassa CS30_FS45 em 3D.....	33
Figura 4.9 - Resultados do ensaio de medição de pH.....	34
Figura 4.10 - Resultados do ensaio de contaminação biológica.....	36
Figura 4.11 - Exemplos de contaminação biológica nas argamassas FS_PCM20 e CS30_FS45, respetivamente	37
Figura 4.12 - Compactação da argamassa no molde (a), molde rasurado (b) e espalhamento após retirar molde (c).	39
Figura 4.13 – Sequência de ensaios no estado endurecido	41
Figura 4.14 - Equipamento utilizado para determinação de condutibilidade térmica (a) e sonda utilizada no ensaio (b).....	42
Figura 4.15 - Equipamento utilizado na medição do módulo de elasticidade dinâmico com proвете em ensaio.	44
Figura 4.16 - Equipamento e disposição do provete no ensaio de resistência à tração por flexão.	45
Figura 4.17 - Equipamento e metade dos provetes iniciais no ensaio de resistência à compressão.....	46
Figura 4.18 - Resultados dos ensaios de resistência à tração por flexão e compressão.....	46
Figura 4.19 - Provetes no ensaio de absorção de água por capilaridade	48
Figura 4.20 - Curvas de capilaridade de ambas as argamassas estudadas.....	48
Figura 4.21 - Provetes no ensaio de secagem.....	50
Figura 4.22 - Curvas de secagem referentes às argamassas em estudo	51
Figura 4.23 - Pormenor da curva de secagem	51
Figura 4.24 - Porosimetria por intrusão de mercúrio.....	53
Figura 4.25 - Altura média da superfície.....	55

Figura 4.26 - Altura máxima da superfície.....	56
Figura 4.27 - Superfície de um provete da argamassa CS30_FS45+F5+CL5 em 2D	56
Figura 4.28 - Superfície de um provete da argamassa CS30_FS45+F5+CL5 em 3D	56
Figura 4.29 - Superfície de um provete da argamassa CS30_FS15_PCM30+CL5 em 2D	57
Figura 4.30 - Superfície de um provete da argamassa CS30_FS15_PCM30+CL5 em 3D	57
Figura 4.31 - Resultados do ensaio de contaminação biológica.....	58
Figura 4.32 - Exemplos de contaminação biológica na argamassa CS30_FS15_PCM30+CL5	58
Figura 5.1 - Resistência à tração por flexão e à compressão das argamassas.....	61
Figura 5.2 - Massa volúmica e porosidade aberta das argamassas.....	62
Figura 5.3 - Comparação entre os resultados do ensaio de contaminação biológica e Sa.....	64
Figura 5.4 - Comparação entre os resultados do ensaio de contaminação biológica e resistência à compressão	65
Figura 5.5 - Comparação entre os resultados do ensaio de contaminação biológica e resistência à tração por flexão.....	66
Figura 5.6 - Comparação entre os resultados de MV e λ	67
Figura 5.7 - Comparação entre os resultados de Rt e Rc.....	69
Figura 5.8 - Curvas de capilaridade.....	70
Figura 5.9 - Curvas de secagem	71
Figura 5.10 - Comparação entre os resultados do ensaio de contaminação biológica e Sa.....	72
Figura 5.11 - Comparação entre os resultados do ensaio de contaminação biológica e pH.....	73
Figura 5.12 - Comparação entre os resultados do ensaio de contaminação biológica e resistência à compressão	74
Figura 5.13 - Comparação entre os resultados do ensaio de contaminação biológica e resistência à tração por flexão.....	74

Índice de Quadros

Quadro 3.1 - Descrição das argamassas e valores de pH	19
Quadro 4.1 - Síntese de objetivos, ensaios e argamassas realizados nas diersas fases de ensaios.....	22
Quadro 4.2 - Denominação e composição das diferentes argamassas.....	23
Quadro 4.3 - Denominação, traço em massa, relação água/material seco e consistência das argamassas	24
Quadro 4.4 - Escala para avaliação de crescimento biológico	25
Quadro 4.5 - Composição e designação das argamassas	29
Quadro 4.6 - Composição e denominação das argamassas	38
Quadro 4.7 - Resultados do ensaio de consistência por espalhamento.....	39
Quadro 4.8 - Resultados do ensaio de medição da massa volúmica	40
Quadro 4.9 - Resultados do ensaio de medição da condutibilidade térmica	42
Quadro 4.10 - Resultados do ensaio de medição da massa volúmica aparente	43
Quadro 4.11 - Resultados do ensaio do módulo de elasticidade dinâmico	44
Quadro 4.12 - Valores assintóticos e coeficientes de capilaridade.....	49
Quadro 4.13 - Índices de secagem e taxas de secagem	52
Quadro 4.14 - Porosidade aberta por intrusão de mercúrio.....	54
Quadro 4.15 - Valores de pH obtidos para as argamassas em estudo	54

Disseminação de Resultados

No âmbito da campanha experimental desenvolvida na presente dissertação já foi realizada uma publicação preliminar, que se apresenta no anexo:

Teixeira, M.; Nunes, L.; Santos, P.; Jamú, N.; Faria, P. (2014) – Argamassas de reboco com cal aérea, terra e fibras naturais: avaliação preliminar da suscetibilidade à contaminação biológica. Argamassas 2014 - I Simpósio de Argamassas e Soluções Térmicas de Revestimento, Universidade de Coimbra, 5-6 Junho de 2014 (CD, ID58).

1. Introdução

1.1. Enquadramento geral

A indústria é, atualmente, uma das maiores produtoras de resíduos em todo o mundo. Com o passar dos anos têm vindo a ser estudados, em diversas áreas, novos materiais elaborados com incorporação desses desperdícios. A área da construção, como grande produtor de resíduos e consumidor de recursos naturais, seguiu igualmente esse caminho, estudando novos materiais e utilizações mais ecológicas.

Os rebocos, além de proporcionarem um efeito estético agradável, têm como objetivo fundamental a proteção dos elementos de alvenaria contra ações externas. São constituídos por uma ou mais camadas sobrepostas, de modo a melhorar a sua aderência e, no caso de rebocos exteriores, a impermeabilização do suporte e de rebocos interiores a resistência ao uso.

Com o intuito de melhorar o comportamento e a ecoeficiência das argamassas de reboco, têm sido estudadas novas argamassas com adições naturais. Estas adições podem ser fibras ou granulados naturais, tais como casca ou palha de cereais, refugo de lã, penas ou crina ou resíduo de cortiça (Teixeira *et al.*, 2014).

Contudo, apesar das melhorias que possam advir da utilização de fibras ou granulados minerais existem alguns problemas que devem ser tidos em conta. No caso particular da utilização de materiais orgânicos um possível aumento do risco de desenvolvimento de bolores e outros fungos nas argamassas, pode pôr em causa a sua durabilidade.

Paralelamente têm sido estudadas as características de argamassas de terra uma vez que se trata de um recurso muito disponível, e mais ecológico e com grande desenvolvimento a nível internacional nos últimos anos. Também neste caso, devido a tratar-se de um material que pode conter uma parcela orgânica, interessa aferir se a biorecetividade será superior à das argamassas comumente usadas.

1.2. Objetivos e metodologia

A presente dissertação tem como objetivo contribuir para um maior conhecimento de argamassas de terra, de cal e mistas, com eventual adição de fibras naturais. Em termos concretos pretende-se principalmente avaliar a suscetibilidade à contaminação biológica de um conjunto de argamassas elaboradas em laboratório, com base nesses constituintes. Serão ainda analisadas algumas características específicas de modo a relacioná-las com o risco de contaminação. A suscetibilidade à contaminação biológica e características afins serão comparadas, sempre que possível, com a caracterização física e mecânica existente dessas argamassas. Nas argamassas onde não existe nenhuma caracterização física e mecânica anterior serão também avaliadas tais características. Toda a caracterização referida é realizada através de

ensaio de provetes em laboratório, simulando condições próximas da realidade ou adequadas para uma realização de ensaios viável.

As argamassas sujeitas à avaliação são elaboradas de modo a avaliar a influência da adição de fibras, de diferentes granulometrias e proporções de areias e ainda da adição de um material de mudança de fase. Ao mesmo tempo pretende-se ainda avaliar a influência da mistura de cal aérea e terra em diferentes proporções. Além destas argamassas é também estudada na presente dissertação uma argamassa pré-doseada fornecida pela empresa EMBARRO.

A caracterização das argamassas, tendo em vista o cumprimento dos objetivos definidos, é sempre que possível realizada com base em normas existentes.

1.3. Estrutura de trabalho

A realização da presente dissertação seguiu diversas etapas. Em primeiro lugar realizou-se uma pesquisa bibliográfica sobre o tema em estudo, de forma a adquirir os conhecimentos indispensáveis para a realização das etapas experimentais e a sintetizar o estado dos conhecimentos na área. Estes permitiram definir os ensaios a realizar, as condições básicas para obter resultados viáveis, assim como os materiais e equipamentos necessários para a realização. Na fase experimental foram analisados os resultados e retiradas as devidas conclusões.

A apresentação do estudo realizado é feita nesta dissertação através de seis capítulos, que se descrevem de seguida, pela bibliografia e anexos.

O primeiro e presente capítulo pretende fornecer um breve enquadramento do tema, definição de objetivos, metodologias utilizadas e apresenta a estrutura de trabalho seguida.

No segundo e terceiro capítulos é feita uma síntese da informação obtida durante a pesquisa bibliográfica, que se enquadra com o tema e também dos conhecimentos adquiridos ao longo do curso considerados úteis para uma melhor compreensão da presente dissertação. No segundo capítulo é dado maior destaque às argamassas, suas características e constituintes enquanto no terceiro capítulo são analisadas as características que afetam a suscetibilidade de uma argamassa à contaminação biológica.

Em seguida, no quarto capítulo, é descrita toda a campanha experimental realizada. Neste capítulo é possível perceber a formulação de cada argamassa analisada, os ensaios realizados e os procedimentos seguidos. São também apresentados os resultados obtidos para cada ensaio e é feita a sua análise.

A discussão global dos resultados é apresentada no quinto capítulo. Aqui é possível confrontar os resultados obtidos entre si e ainda com outros obtidos em estudos anteriores.

Por último, no capítulo seis são apresentadas as conclusões obtidas com todo o processo descrito e são, ainda, propostos estudos de desenvolvimento futuros que poderão complementar esta dissertação.

Por fim é apresentada a bibliografia consultada e em anexos são apresentados a ficha técnica do PCM utilizado e todos os resultados obtidos e a disseminação de resultados efetuada até à data da entrega da dissertação.

2. Considerações gerais sobre argamassas

2.1. Definição e classificação de argamassas

Uma argamassa consiste numa mistura homogênea de agregados, ligantes e água, podendo conter adições e/ou adjuvantes e pode ser doseada em obra ou industrialmente. O tipo de agregado é importante para a definição da argamassa e este deve ser escolhido por ter uma boa distribuição granulométrica e teor em argila controlado.

As argamassas podem ter diversos propósitos como: unir componentes de alvenaria, cobrir e regularizar superfícies, unir componentes de acabamento decorativos, corrigir imperfeições, dar acabamento final, entre outras.

Segundo Silva (2008), as argamassas podem ser organizadas segundo diferentes classificações: natureza do ligante, número de ligantes, consistência, função e tipo de preparação.

Quanto à natureza do ligante, uma argamassa pode ser considerada aérea, hidráulica ou mista - de cal aérea, de cimento ou bastarda de cal aérea e cimento, entre outros. Uma argamassa aérea é preparada com ligante aéreo, que carbonata em contacto com o CO₂ do ar. Por sua vez, uma argamassa hidráulica é preparada com ligante hidráulico e ganha presa por reações com a água. As mistas ou bastardas são geralmente constituídas por ligantes hidráulicos e aéreos, ocorrendo simultaneamente carbonatação e hidratação.

A classificação quanto ao número de ligantes divide as argamassas em dois tipos: argamassas simples e mistas ou bastardas. As argamassas simples são constituídas por um único ligante enquanto as mistas são constituídas por mais que um ligante.

As argamassas, quanto à sua consistência, podem ser classificadas de secas, plásticas ou fluidas. São consideradas secas as argamassas cujo índice de consistência seja inferior a 250mm, com índice de consistência entre 260 e 300mm consideram-se plásticas e para valores superiores a 360mm consideram-se fluidas (Silva, 2008).

As funções de uma argamassa são muito variadas, nomeadamente: argamassas de assentamento de alvenarias ou cantarias, argamassas de colagem de ladrilhos, argamassas de reboco, argamassas de betonilhas de regularização, entre outras.

O tipo de preparação é definido pelo local onde é feita a dosagem da mistura seca. Assim, considera-se uma argamassa tradicional aquela que é preparada em obra e uma argamassa industrial ou pré-doseada aquela que é preparada em fábrica. Geralmente, em obra é apenas efetuada a adição de água e a amassadura.

Nesta dissertação de mestrado são estudadas argamassas de reboco e, por esse motivo, será dado maior destaque às suas características.

2.2. Argamassas de reboco

2.2.1. Definição e características

Uma argamassa de reboco é usada para revestir as paredes, pelo exterior ou pelo interior, devendo apresentar as características necessárias para um bom desempenho das suas funções.

Os rebocos constituem a primeira proteção das paredes dos edifícios, tendo também, em função da sua espessura e constituição, alguma responsabilidade no comportamento e conforto térmico dessas paredes e particularmente no seu aspeto estético. Têm assim como função proteger o edifício da ação das intempéries, garantindo as funções de impermeabilização, resistência mecânica e assegurar o efeito estético da fachada. Estes revestimentos são aplicados diretamente sobre a generalidade dos materiais constituintes dos paramentos verticais, de forma manual ou por projeção mecânica.

A aplicação de um reboco tradicional é constituída por três camadas: chapisco, salpisco ou crespido, camada de base e camada de acabamento (Veiga e Faria, 1990).

O chapisco é a primeira camada a ser aplicada e tem como função melhorar a aderência entre o suporte e a camada seguinte. Esta camada deve ser o mais fluida possível e irregular. A camada de base é aplicada sobre o chapisco e constitui a camada principal do reboco. Atua ainda como base para a aplicação da camada seguinte. Tem como principal função a impermeabilização do reboco e a regularização da superfície. Por último, é aplicada a camada de acabamento, geralmente em espessura fina para limitar eventuais fissuras por retração (Veiga e Faria, 1990).

Na dosagem de uma argamassa é sempre necessário ter em conta o traço e relação água/ligante.

Chama-se traço à proporção, em volume ou massa, entre os vários componentes das argamassas (ligantes e agregados) que varia de acordo com os constituintes, a finalidade e as características desejadas da argamassa. A relação água/ligantes define a quantidade de água que é necessário adicionar à mistura seca para obter uma trabalhabilidade adequada.

Tal como referido anteriormente, existem diversos ligantes utilizados em construção consoante o propósito a que se destinam. Estes ligantes dividem-se em dois grupos: ligantes aéreos e ligantes hidráulicos.

2.2.2. Argamassas de cais

Em Portugal, a cal é utilizada em construção, desde os tempos mais antigos. O conhecimento e adequação da cal ao tipo de utilização pretendido eram adquiridos pelos trabalhadores e passado de geração em geração, sendo aperfeiçoado com o passar dos anos.

Até ao aparecimento do cimento, a cal era o ligante mais utilizado em argamassas para assentamento de alvenarias e em rebocos. Com o aparecimento do cimento, a utilização da cal na construção diminuiu drasticamente, diminuindo assim, também, a mão-de-obra especializada.

A utilização do cimento para recuperação e reabilitação de edifícios antigos provocou vários problemas de compatibilidade entre os materiais existentes e os novos. Deste modo, nas últimas duas décadas, a cal tem recuperado o seu papel na conservação do património arquitetónico (Faria *et al.*, 2008).

Em termos de normalização, a cal é dividida em dois tipos: cal aérea e cal com propriedades hidráulicas (IPQ, 2011).

A cal aérea, segundo a NP EN 459-1 (IPQ, 2011), é um ligante que pode ser dividido em dois grupos consoante a sua composição: cal cálcica e cal dolomítica. A cal cálcica é constituída sobretudo por óxidos de cálcio, CaO , ou hidróxidos de cálcio, Ca(OH)_2 , enquanto a cal dolomítica é constituída pelo mesmo óxido ou hidróxido mas com presença de magnésio. Ambas endurecem lentamente ao ar por reação com o dióxido de carbono. Em geral, a cal aérea não endurece na água pois não possui propriedades hidráulicas. Pode ainda tratar-se de uma cal viva ou hidratada. A cal viva é sobretudo constituída por óxido de cálcio e quando reage com água forma hidróxido de cálcio, ou seja, cal hidratada. Este tipo de cal também é conhecido por cal apagada.

Pode ser comercializada em diferentes formas: em pó, cal hidratada seca, cal finamente triturada (necessita de ser hidratada *in situ* antes de ser utilizada) e em pasta com diferentes períodos de extinção (Faria *et al.*, 2008).

Segundo a NP EN 459-1 (IPQ, 2011), as cals hidráulicas dividem-se em três tipos diferentes: as hidráulicas (HL), as hidráulicas naturais (NHL) e as formuladas (FL).

A cal hidráulica (HL) é um ligante constituído por cal e outros materiais como o cimento, a escória granulada de alto-forno, cinzas volantes, fíler calcário e outros materiais adequados, dentro dos limites definidos pela norma.

Por sua vez, a cal hidráulica natural (NHL) é produzida pela cozedura, até uma temperatura de 1200°C , de rocha calcária mais ou menos argilosa e siliciosa, extintas e reduzidas a pó, com ou sem moagem. Este tipo de cal não pode conter qualquer adição e tem de cumprir um teor mínimo de hidróxido de cálcio e um máximo de sulfato, definidos pela norma. A presa e o endurecimento ocorrem em contacto com água mas devido à existência de uma percentagem de cal livre. O endurecimento vai ocorrer, a longo prazo, também por carbonatação.

Quando a uma cal hidráulica natural (NHL) se incorpora qualquer tipo de adição a sua designação passa a ser cal formulada (FL).

2.2.3. Argamassas de terra

Como material muito abundante e sem necessidade de tratamentos especiais, a terra é utilizada desde a antiguidade na construção de habitações.

Nas regiões com climas secos ou temperados, a terra tem sido sempre o material de construção predominante. Na atualidade, um terço da população mundial vive em construções de terra e nos países em desenvolvimento esse valor sobe para metade da população. Prevê-se que, especialmente nos países em desenvolvimento, este material continue a ter um papel muito relevante (Lima, 2013).

Em Portugal, é possível encontrar edificações de terra em diversas zonas do país como a zona aluvial do baixo Douro, de Castelo Branco e, em maior quantidade, nas zonas do Alentejo e Algarve (Faria, 2007).

Por se tratar de um material facilmente acessível é necessário tomar precauções. Tal como se encontra na natureza, a terra trata-se de um material não padronizado, o que faz variar a sua composição e características. Esta variação pode levar a uma maior ou menor adequação face às necessidades construtivas. Por conseguinte, a sua aplicação na construção necessita de um controlo prévio da sua composição que, se necessário, levará a uma correção da mistura.

Como foi referido anteriormente, a necessidade de reduzir o consumo de matérias-primas e o gasto de energia, aliado à necessidade de reabilitação dos edifícios antigos de terra têm vindo a aumentar os estudos sobre este tipo de material, as suas utilizações e possíveis misturas com ligantes utilizados correntemente.

Pode-se definir uma argamassa de terra como uma mistura de terra argilosa, de granulação fina, com areia e água. Este tipo de argamassa tem como principais características uma maior compatibilidade com materiais mais antigos quando comparado com argamassas de cimento e um menor consumo energético durante o fabrico dos seus constituintes (Eires *et al.*, 2014).

Nestas argamassas a argila funciona como ligante ou aglomerante e, deste modo, a terra utilizada para a construção deve ser suficientemente rica em argila de modo a permitir uma boa plasticidade enquanto molhada e dureza enquanto seca. É de salientar o facto de, ao contrário dos ligantes comuns, a argila não apresentar um processo de endurecimento irreversível. Isto é, após ser obtido o endurecimento é possível retomar a plasticidade original através da adição de água. Tal não é possível nas argamassas de cimento ou cal.

Os agregados utilizados nas argamassas de terra podem ser siltes ($0,002 > 0,06$ mm), areias ($0,06 > 2$ mm) e, mais raramente, gravilhas (> 2 mm) consoante a sua dimensão (Gomes *et al.*, 2014). Tal como nas argamassas convencionais, o conjunto dos agregados deve apresentar uma boa distribuição granulométrica, de modo a proporcionar maior resistência mecânica.

A argamassa de terra tem ainda como principal característica uma elevada higroscopicidade e um reduzido impacto ambiental e energético (Lima, 2013).

Considerando que ambientes interiores demasiados húmidos potenciam o desenvolvimento de microrganismos e que um ambiente com humidade relativa reduzida pode provocar secagem da mucosa das vias respiratórias levando ao aparecimento de inflamações respiratórias, o facto das argamassas de terra possuírem uma elevada higroscopicidade torna-as um regulador de humidade natural, ajudando ainda na preservação dos restantes materiais (Lima, 2013).

Definem-se, essencialmente, três tipos de tecnologias de construção em terra: duas com função resistente, o adobe e a taipa e uma vocacionada para a construção de paredes divisórias, o tabique.

Assim, o adobe consiste numa parede de alvenaria, com funções resistentes, executada com tijolos de terra enformados e secos ao ar. Tem como vantagem a possibilidade de poder ser efetuada em diversas espessuras e como desvantagem a necessidade elevada de água, comparando com a taipa.

A taipa é igualmente um tipo de construção de paredes com função resistente. Contudo, neste caso a estrutura é monolítica, uma vez que resulta da compactação de camadas finas de terra dentro de uma cofragem.

Sobre estas paredes é muitas vezes aplicada uma camada de reboco que servirá de proteção contra os agentes atmosféricos e ainda como melhoria estética. O reboco é aplicado em diversas camadas e pode ser constituído apenas por argamassas de terra, mais utilizado no interior, ou por argamassas de terra e cal. A utilização de materiais com características mecânicas muito diferentes do suporte, neste caso terra, levará à ocorrência de anomalias. Assim, é preciso estudar bem o tipo de suporte e escolher o material mais adequado.

O tabique, contrariamente às anteriores, é maioritariamente um tipo de construção de paredes divisórias não resistentes no qual é aplicada uma argamassa de terra entre e sobre um suporte de madeira.

A compatibilidade entre as alvenarias de terra e os rebocos de terra deve-se, sobretudo, à proximidade de valores de módulo de elasticidade. Segundo Röhen e Ziegert (2011) a alvenaria de terra possui um módulo de elasticidade entre 0,5 e 3 GPa enquanto as argamassas de terra apresentam valores na ordem dos 1 a 5 GPa. Por sua vez, o betão apresenta um módulo de elasticidade que varia entre os 15 a 50 GPa, o que o torna bastante incompatível com os valores anteriores.

Como atrás foi referido, a utilização da terra em argamassas possibilita ainda uma melhoria estética uma vez que a sua utilização permite obter uma gama de cores e texturas interessantes.

2.2.4. Argamassas de cal e terra

Tradicionalmente, adicionava-se cal aérea a argamassas de terra quando se pretendia maior durabilidade em rebocos exteriores, nomeadamente face à ação da chuva. Com o objetivo de caracterizar argamassas

com os benefícios da cal e da terra, desenvolveram-se estudos experimentais nos quais estes dois ligantes surgem juntos (Faria *et al.*, 2013; Faria *et al.*, 2014).

A adição de determinadas percentagens de cal aérea a argamassas de terra tem como objetivo uma melhoria das características mecânicas. Esta adição possibilita um aumento da resistência mecânica e consequentemente um aumento da durabilidade. Nesta argamassa a cal funciona como aglutinador das partículas de terra diminuindo os vazios existentes.

Por sua vez, a adição de terra a argamassas de cal permite uma redução do consumo energético e por isso a criação de uma argamassa mais ecológica. A introdução de terra em argamassas de cal aérea permite obter uma gama de cores distinta das argamassas só de terra mas ainda assim interessantes.

Contudo, a mistura destes dois ligantes tem como desvantagem a perda de características importantes e próprias da sua utilização em separado.

2.2.5. Argamassas com fibras naturais

A introdução de fibras naturais em argamassas é feita desde os primórdios da construção. Segundo Gomes (2013), os materiais tradicionais de terra incluíam, frequentemente, essas fibras. Todavia, com o desenvolvimento da indústria do cimento, que levou à redução da utilização de argamassas de cal e de terra, essa incorporação de fibras diminuiu drasticamente.

Nos últimos anos com o novo incremento na utilização argamassas de cal e/ou terra, tem vindo a ser estudada a inclusão de fibras naturais de modo a melhorar o seu comportamento em termos de retração, ou seja, minorar os efeitos da fendilhação das argamassas. Porém, devido à elevada variedade de fibras naturais com potencial de utilização e com diferentes propriedades torna-se necessário estudar as suas características e o modo como estas interagem com a argila e a cal.

Segundo o ensaio experimental realizado por Eires *et al.* (2014) admite-se que a inclusão de fibras naturais, dependendo do seu tipo e da sua proporção, melhora mais características das argamassas para além de minorar os efeitos da fendilhação. O trabalho referido destaca que a incorporação de fibras contribui também para uma maior durabilidade da argamassa uma vez que melhora o seu desempenho em termos de resistências mecânicas, absorção e secagem. Contudo, apesar das conclusões obtidas por estes autores, sabe-se que, em termos de absorção e secagem, o desempenho da argamassa poderá não ser melhorado uma vez que os materiais como as fibras têm uma grande capacidade de absorver água e retê-la durante o processo de secagem.

2.2.6. Argamassas com PCM

Nos últimos anos tem existido uma preocupação cada vez maior com as emissões de gases tóxicos para o ambiente. Ao crescimento verificado nas zonas urbanas está associado um aumento de consumo energético que resulta numa maior emissão de gases, provocando graves impactos ambientais. Grande parte do consumo de energia elétrica no setor residencial encontra-se associado ao aquecimento e arrefecimento (Cunha *et al.*, 2012). Como tal, torna-se urgente a utilização de soluções construtivas que permitam uma diminuição do recurso a equipamentos de climatização. Com o intuito de reduzir esse consumo, têm vindo a ser estudados materiais que incorporem materiais de mudança de fase (PCM).

Este tipo de tecnologia, denominada nanotecnologia, consiste no estudo da manipulação de matéria com dimensão entre 1 e 100 nanómetros, de modo a desenvolver materiais ou componentes e encontra-se neste momento associada a diversas áreas de investigação.

No que diz respeito à construção, a nanotecnologia surge, entre outros, associada às argamassas. Esta associação permite a incorporação de nanomateriais que possibilitam o desenvolvimento de novas argamassas inovadoras e de desempenho melhorado quando comparado com as tradicionais. Este tipo de soluções traz benefícios técnicos, ambientais, energéticos e económicos (Flores-Colen, 2014).

Segundo Cunha *et al.* (2012), os materiais de mudança de fase possuem a capacidade de mudar o seu estado em função da temperatura ambiente. Ou seja, quando a temperatura do ambiente em que o PCM se encontra aumenta, passando o ponto de fusão do material, este muda do estado sólido para líquido, absorvendo e armazenando calor. Posteriormente, quando a temperatura do ambiente que rodeia o PCM baixa, passando o ponto de solidificação, este retorna ao estado sólido, libertando a energia armazenada anteriormente. Diz-se, portanto, que estes materiais têm capacidade de armazenar energia térmica.

Em 1983, Abhat definiu uma classificação para os materiais de mudança de fase que os divide em três grupos: orgânicos, inorgânicos e eutéticos. Zalba *et al.* (2003), Sharma *et al.* (2009), Memon (2014) e outros autores utilizam a mesma classificação de Abhat para agrupar os diferentes tipos de materiais de mudança de fase. A figura 2.1 apresenta esquematicamente a classificação definida para os PCM, com base na sua composição química e ainda as subclasses em que estes se dividem.

Esta tecnologia já é muito utilizada em algumas áreas, nomeadamente no que diz respeito ao armazenamento de energia solar ou no controlo de ambiente de edifícios e transporte de cargas.

Memon (2014) define quatro modos de introdução de materiais de mudança de fase em materiais de construção ou elementos construtivos: incorporação direta, imersão, encapsulamento, incorporação em suportes.

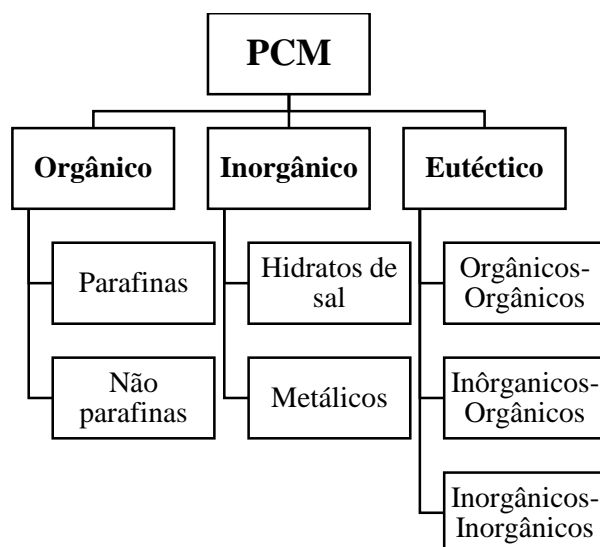


Figura 2.1 - Classificação dos PCM segundo Sharma *et al.* (2009)

A incorporação direta é o método mais simples, viável e económico dos conhecidos. Neste método o material de mudança de fase, durante a sua produção, é misturado diretamente com os materiais de construção, tais como: gesso, cola, argamassa ou betão. Uma vez que a incorporação de PCM pode interferir com o processo de hidratação e com as propriedades mecânicas dos materiais, é necessário efetuar um estudo prévio sobre quais os efeitos que poderão ocorrer (Memon, 2014).

A técnica de incorporação de PCM em materiais de construção através de imersão consiste em mergulhar elementos construtivos, como por exemplo os tijolos ou peças de betão, num líquido constituído por PCM. Através da ação capilar os elementos construtivos vão absorver os materiais de mudança de fase alterando assim as suas características. Tal como no método anterior, as propriedades mecânicas dos materiais que incorporam os PCM podem ser alterados. A esta desvantagem acresce ainda o facto de as nano-partículas poderem sair do elemento onde estão inseridas devido aos vários ciclos térmicos a que estão sujeitos (Memon, 2014).

No que diz respeito ao método de encapsulamento, este pode ser dividido em dois tipos: macroencapsulamento e microencapsulamento. Neste processo os materiais de mudança de fase são encapsulados antes de serem incorporados nos materiais construtivos. Portanto, o encapsulamento deve cumprir exigências de resistência e durabilidade, protegendo o PCM e permitindo, ao mesmo tempo, que ocorram transferências de calor (Memon, 2014).

No caso da microencapsulação, pequenas partículas de PCM, que variam entre 1nm e 1000nm, são colocadas em cápsulas feitas, geralmente, a partir de polímeros naturais e sintéticos. Podem ser utilizados, neste processo, materiais de mudança de fase aos quais estão associadas temperaturas de mudança de fase entre os -10°C e os 80°C. Este método tem como principais vantagens o facto de impedir que o PCM se propague durante a fase líquida, a elevada taxa de transferência de calor, uma vez que possui uma maior

área de superfície por unidade de volume, a capacidade de resistir às mudanças de volume durante as fases de transição, uma maior estabilidade química e ainda uma maior confiabilidade térmica. A diminuição da taxa de transferência de calor devido à rigidez do invólucro impedir a convecção natural, a modificação das propriedades mecânicas dos materiais de construção, bem como o alto custo de investimento são algumas das desvantagens que este tipo de encapsulamento contém (Memon, 2014).

No macroencapsulamento uma grande quantidade de PCM podem ser colocados em invólucros, nomeadamente tubos, esferas e painéis, para subsequente utilização em elementos de construção. As principais vantagens deste procedimento baseiam-se no fácil transporte e manuseamento, na melhoria da compatibilidade dos materiais de mudança de fase com o ambiente, uma vez que agem como uma barreira e a redução das mudanças de volume. Por sua vez, como desvantagens destaca-se a pobre condutibilidade térmica e o aumento da mão-de-obra para a sua integração em edifícios (Memon, 2014).

A incorporação de materiais de mudança de fase em suportes utiliza materiais como o polietileno de alta densidade, o estireno e o butadieno. Estes materiais são fundidos juntamente com os PCM, misturados a temperaturas elevadas e em seguida arrefecidos até se tornarem sólidos e com a forma desejada. Têm como principais características um elevado calor específico aparente, uma condutibilidade térmica adequada, serem termicamente fiáveis e ainda o facto de não haver necessidade de um recipiente.

Apesar das vantagens que a utilização de materiais de mudança de fase pode trazer em termos de propriedades térmicas dos materiais, especificamente das argamassas, o aumento progressivo da adição destes materiais faz com que as características mecânicas diminuam (Meshgin *et al.*, 2012). Assim, é necessário encontrar um equilíbrio de modo a que se obtenham resultados adequados tanto ao nível de conforto como de segurança.

Num estudo realizado por Cunha *et al.* (2012), em que o objetivo passava pelo desenvolvimento de uma argamassa mista de cal aérea e gesso, com incorporação de PCM, que possuísse um compromisso entre a trabalhabilidade, resistência mecânica e a aparência estética, verificou-se que a incorporação de microcápsulas de PCM em argamassas de revestimento para interiores é uma solução viável. Observou-se ainda que, apesar do aumento da retração causado pela introdução destes materiais, a utilização de fibras constitui uma boa solução para resolver esse problema. Os autores referem também, pelos ensaios realizados, que as argamassas com percentagens de PCM entre 15% e 20% apresentam o melhor desempenho.

Além da utilização de PCM em argamassas, tem vindo a ser estudada a sua inclusão nos mais diversos materiais. Omer *et al.* (2001), citados por Zalba *et al.* (2003), incorporaram um material de mudança de fase no díodo térmico para melhorar a eficácia de dissipadores de calor. Zalba *et al.* (2003) citam também Ismail *et al.* (2001) que estudaram a possibilidade de diminuir os ganhos solares em edifícios utilizando uma cortina de PCM no interior de uma janela de vidro duplo.

3. Contaminação Biológica

Os fungos, designadamente leveduras, bolores ou cogumelos, desempenham um papel fundamental na cultura humana e na evolução da espécie ao longo dos anos. São exemplos disso a produção de pão ou cerveja. Não obstante, existem alguns fungos que além de nocivos para a saúde humana, também podem causar degradação em materiais de construção e consequentemente nas estruturas que os contêm (Sterflinger, 2010).

O efeito nocivo dos biocolonizadores na construção pode conduzir a situações extremas de degradação incluindo o eventual colapso das estruturas mas um dos aspetos chave da biocolonização é o efeito negativo sobre a aparência do material em que se desenvolve, conferindo um aspeto de decadência e abandono aos edifícios (Henriques *et al.*, 2007).

3.1. Fatores condicionantes

A contaminação biológica de argamassas de reboco pode acontecer na presença de todos os ligantes. Contudo, alguns possuem uma maior predisposição para que tal aconteça devido as suas características físicas e químicas.

Segundo Röhlen (2012), são três os fatores determinantes para o desenvolvimento biológico: a humidade, a temperatura e o teor em nutrientes.

A presença de água é fundamental para o desenvolvimento dos micro-organismos responsáveis pela degradação dos materiais e como tal valores de humidade relativa elevados beneficiam o seu desenvolvimento. A temperatura é um fator limitante do crescimento da maioria dos micro-organismos podendo ser letal para valores muito negativos (da ordem dos -20°C) ou acima de $55-60^{\circ}\text{C}$ (Alexopoulos *et al.*, 1996). Uma temperatura média constante da ordem dos $20-25^{\circ}\text{C}$ é geralmente a mais favorável ao desenvolvimento dos micro-organismos. O teor de nutrientes existente nas superfícies (quer dos próprios materiais quer os que resultam da acumulação de pó) é também muito importante sendo que uma quantidade mínima parece estimular o crescimento (Röhlen, 2012).

Aos fatores referidos anteriormente podem-se acrescentar, ainda, os que advêm das características dos rebocos. Assim, é importante destacar o pH, a rugosidade e a porosidade.

Relativamente ao pH, valores inferiores ou próximo de 9 permitem a colonização enquanto valores superiores ou perto de 10 inibem o crescimento biológico (Shirakawa *et al.*, 2003). De modo a quantificar os valores de pH de argamassas com diferentes ligantes, foi realizada uma investigação específica que será descrita em 3.1.2..

A rugosidade é um fator muito importante na biodegradação dos materiais. Uma maior rugosidade pressupõe que irá ocorrer uma maior contaminação biológica. Isto acontece quer devido a uma maior facilidade de aderência por parte do contaminante (Tran *et. al.*, 2013) quer por normalmente facilitar a acumulação de pó na superfície que pode funcionar como fonte adicional de nutrientes ou por permitir a acumulação localizada de água.

A porosidade é afetada pela dimensão do agregado e pela proporção água/ligante existente nas argamassas. Uma maior porosidade pode diminuir a resistência da argamassa, bem como aumentar a sua permeabilidade, resultando numa maior disponibilidade para a colonização de microrganismos (Giannantonio *et. al.*, 2009). Apesar disso, alguns estudos realizados por Shirakawa *et al.* (2003) e Tran *et al.* (2013) mostram que o efeito da porosidade é mínimo comparativamente a outras características.

3.1.1. Avaliação da rugosidade

A rugosidade de uma superfície pode ser quantificada pelos desvios verticais da mesma quando comparada com a forma ideal. Logo, se os desvios são grandes, a superfície é mais rugosa, enquanto se esses desvios forem pequenos a superfície torna-se mais lisa.

Numa argamassa de reboco, a rugosidade desempenha um papel importante na determinação de como esta vai interagir com o meio ambiente. Isto é, um reboco mais rugoso poderá provocar um efeito estético interessante mas aumenta o risco de contaminação biológica.

A medição da rugosidade pode ser feita visualmente através de comparação com uma superfície da qual se conheçam os parâmetros. Porém, este método é muito impreciso, o que levará a erros. O método mais adequado e preciso de medição de rugosidade é através de um perfilómetro.

Um perfilómetro é um instrumento de medição utilizado para medir o perfil de uma superfície, de modo a quantificar a sua rugosidade. Esta medição pode ser feita linearmente ou em três dimensões. Existem dois tipos de perfilómetros: de contacto e óticos.

Os perfilómetros de contacto funcionam através de uma agulha de diamante que é movida verticalmente e lateralmente sobre uma amostra, mantendo sempre o contacto com esta. Tem como principais vantagens o facto de, uma vez que se encontra em contacto com a amostra não sofre erros devido a contaminantes de superfície que possam existir e ainda pela ponta da agulha poder ser bastante pequena e por isso permitir uma boa resolução.

Os perfilómetros óticos fornecem o mesmo tipo de informação dos de contacto mas utilizando para tal um laser, o que permite que não ocorra contacto entre o perfilómetro e a amostra a ensaiar. As principais

vantagens são a velocidade de ensaio ser superior e a fiabilidade do equipamento, uma vez que, por não existir contacto, não ocorre desgaste do medidor, necessitando assim de menor manutenção.

Os parâmetros existentes para a total definição da rugosidade de uma superfície são dados descritos pela norma ISO 25178-2 (ISO, 2012) como sendo de cinco tipos: parâmetros de altura, parâmetros espaciais, parâmetros híbridos, parâmetros relacionados com a segmentação e outras funções e parâmetros. Na presente dissertação, uma vez que o principal objetivo não consiste no estudo da rugosidade, serão analisados apenas os parâmetros que permitam obter valores facilmente comparáveis. Esses parâmetros pertencem ao grupo dos parâmetros de altura e, com base no descrito na norma e em Gadelmawla *et al.* (2002), são definidos por:

- Altura média da superfície (Sa) – parâmetro de rugosidade mais utilizado devido à sua fácil definição, fácil medição e boa descrição da rugosidade.
- Desvio-padrão da altura da superfície (Sq) – importante como complemento do parâmetro Sa uma vez que permite compreender a precisão dos valores.
- Altura máxima de picos (Sp) – altura máxima do perfil acima da linha média definida.
- Altura máxima de vales (Sv) – profundidade máxima do perfil abaixo da linha média definida.
- Altura máxima da superfície (Sz) – distância vertical entre o Sp e o Sv.

3.1.2. Caracterização do pH de argamassas de diferentes ligantes

O potencial de hidrogénio, comumente conhecido pelas siglas pH, é uma escala logarítmica que mede o grau de acidez ou basicidade de uma determinada solução. Essa escala compreende valores entre 0 e 14, sendo que o 7 é considerando o valor neutro. Os valores entre 0 e 7 são considerados ácidos e entre 7 e 14 são considerados básicos. O valor do pH está diretamente relacionado com a quantidade de iões de hidrogénio numa determinada solução.

Como forma de medição do valor de pH de uma solução podem-se utilizar indicadores que mudam de cor consoante a acidez/basicidade ou aparelhos eletrónicos. No caso dos indicadores com base na mudança de cor, o mais utilizado é a fenolftaleína. Tem a vantagem de ser prático e rápido de utilizar. Apesar disso os valores obtidos não são exatos; são apenas qualitativos. Os aparelhos eletrónicos, apesar de terem uma utilização mais complexa, fornecem valores mais exatos.

Na pesquisa bibliográfica efetuada, constatou-se que o pH das argamassas é determinante na ocorrência de contaminação biológica.

Segundo Rosato (2006), o pH de uma argamassa de cimento varia entre os valores de 12 e 13 para amostras que não tenham sofrido carbonatação da cal livre, ocorrendo um abaixamento desse valor para valores inferiores a 10 após ocorrer carbonatação. No caso de o ligante ser cal aérea, Faria (2004) ensaiou diversas

argamassas, com diferentes traços e tipos de pozolanas e refere que, com a ocorrência de carbonatação, o pH da argamassa baixa de 12.5 para valores inferiores a 9. Ao analisar argamassas bastardas compostas por cimento e cal aérea, Shirakawa *et al.* (2003) menciona que estas possuem um pH de 12 antes de ocorrência de carbonatação e de 9 após sofrerem carbonatação. Para argamassas em que o ligante é cal hidráulica ou cal hidráulica natural, através de consulta de fichas técnicas, constatou-se que o pH das argamassas antes de ocorrer carbonatação é de 12.3.

Salienta-se o caso das cais com propriedades hidráulicas (NHL ou HL) onde não foi possível obter o valor para pH após carbonatação. Contudo, será de esperar que se encontre entre os valores das cais aéreas naturais e dos cimentos.

Relativamente a argamassas de terra, os valores de pH não são tão diretos devido à variação das características de cada tipo de terra. No entanto, segundo Galán-Marin *et al.* (2010), para uma argamassa de terra comercial o pH do solo é de 8.

De modo a facilitar a visualização e perceção das diferenças entre pH de ligantes, a Figura 3.1 apresenta os valores obtidos e ainda o limite teórico que permite a colonização biológica.

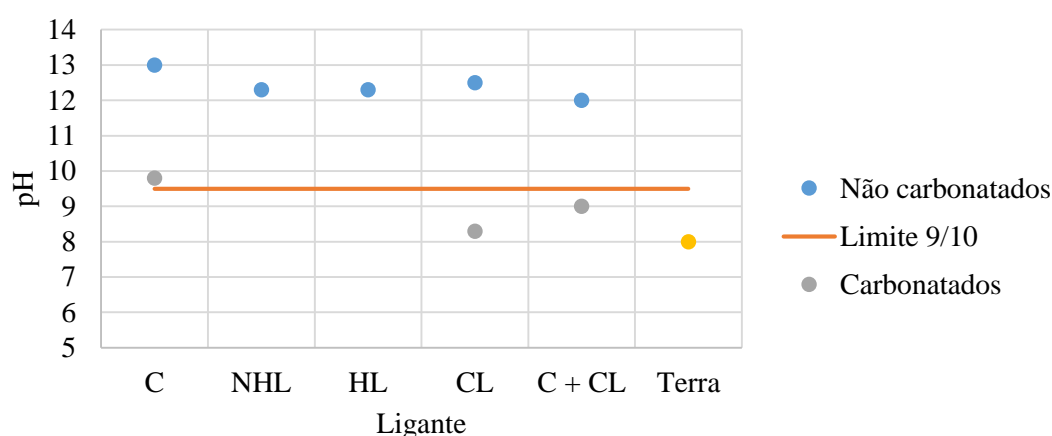


Figura 3.1 - Valores de pH para argamassas com principais ligantes

Na Figura 3.1 a argamassa de terra aparece com cor diferente das restantes argamassas uma vez que não se pode incluir nas classes “Não carbonatados” ou “Carbonatados” pois tal fenómeno não ocorre.

Para além dos casos anteriormente referidos, em que as argamassas são apenas constituídas por ligantes e agregados deve referir-se o trabalho e Pelosi *et al.* (2013) na qual se avaliou a composição e o comportamento de argamassas comerciais usadas em reabilitação de edifícios com problemas de sais. O estudo analisa vinte argamassas pré-doseadas, em duas fases distintas: antes da amassadura (produtos em pó) e após endurecimento das argamassas. Para a análise em questão apenas são apresentados os valores de pH no estado endurecido uma vez que são os valores que interessam para a contaminação biológica. A descrição de cada tipo de argamassa, bem como os valores de pH, são apresentados no Quadro 3.1. Chama-se a atenção para o facto de, devido à atualização em 2010-2011 da versão da norma das cais de construção

(CEN, 2010; IPQ, 2011), com subsequente alteração das cal hidráulicas naturais, ser possível que as argamassas com cal NHL referidas nessa investigação possam ter a cal classificada ainda segundo a versão anterior da norma.

Quadro 3.1 - Descrição das argamassas e valores de pH segundo Pelosi *et al.* (2013)

Argamassa	Aplicação	pH
Pré-doseada com base em cal hidráulica	Exterior	10.41
Pré-doseada de cal hidráulica, macro-porosa	Interior	9.93
Cal hidráulica natural, cal hidráulica e pozolana natural	Exterior	10.07
Cal hidráulica natural com pozolana natural	Interior	10.15
Cal hidráulica natural com pozolana natural	Interior	10.22
Cal hidráulica natural branca e aditivos	Exterior	10.12
Pré-doseada com cal aérea, pozolanas e aditivos	Exterior	7.98
Pré-doseada de cal aérea, pozolanas e aditivos, macro porosa	Interior	8.19
Cal hidráulica natural e pozolanas naturais	Exterior	9.84
Cal hidráulica natural e pozolanas naturais. Poucos sais solúveis	Interior	9.83
Pré-doseada de ligantes hidráulicos, aditivos e fibras sintéticas	Exterior	8.61
Pré-doseada de ligantes hidráulicos, aditivos e fibras sintéticas	Interior	7.69
Pré-doseada de ligantes hidráulicos	Exterior	9.03
Cal hidráulica natural	Exterior	7.81
Cal hidráulica natural, macro porosa	Interior	8.73
Cal hidráulica natural com fibras naturais	Interior	8.50

Os valores de pH apresentados no Quadro 3.1 foram agrupados consoante o ligante da argamassa em causa e a existência ou não de adições. Consequentemente, e relacionando esses grupos de valores com o valor máximo de pH para que ocorra contaminação biológica, obteve-se a Figura 3.2.

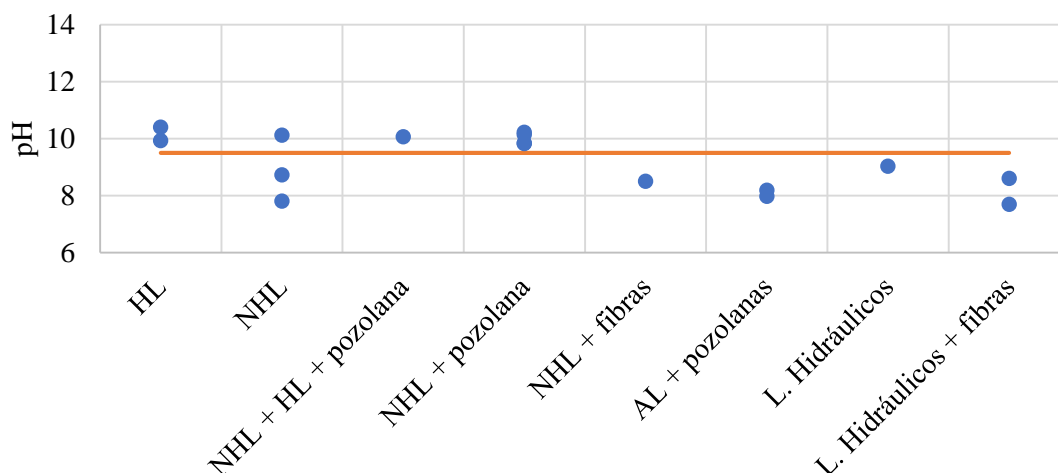


Figura 3.2 - Valores de pH de argamassas diversas segundo Pelosi *et al.* (2013)

Com base no conhecimento adquirido, pode-se concluir que é expectável que as argamassas com ligantes como o cimento ou cal (aérea e com propriedades hidráulica) apresentem baixos níveis de contaminação biológica. Contrariamente, espera-se que uma argamassa de terra obtenha valores elevados no que à contaminação biológica diz respeito, uma vez que o seu pH é dos mais baixos. É possível ainda reparar que a adição de fibras e outras adições baixa, em geral, o pH da argamassa. Este facto faz com que a introdução destes materiais aumente o risco de colonização quando comparado com argamassas sem adições.

4. Campanha experimental

4.1. Introdução

A campanha experimental realizada é composta por três ciclos de ensaio distintos: ensaios preliminares (ou fase 0), primeira fase de ensaios (fase 1) e segunda fase de ensaios (fase 2).

Na fase de ensaios preliminares foram ensaiados quanto à sua suscetibilidade para contaminação biológica provetes de argamassa já realizados e utilizados previamente para ensaio de porosidade aberta em estudos anteriores (Santos, 2014a). Nesta fase testou-se ainda se o procedimento escolhido para os ensaios seria o mais adequado.

Em seguida foi realizada a primeira fase de ensaios, com provetes de argamassas realizados especificamente para o presente trabalho de investigação, argamassas estas que foram caracterizadas em paralelo e complementarmente no estudo realizado por Santos (2014b). Nesta fase estudou-se, além da maior ou menor capacidade de resistir ao crescimento biológico, o pH e a influência rugosidade dos provetes. Com efeito, com base na sua constituição resultam provetes com rugosidades distintas.

Por último, com os resultados obtidos nas fases anteriores optou-se por realizar uma segunda fase de ensaios onde são realizados os mesmos ensaios que na primeira fase mas em novos provetes, a partir de argamassas que complementam as caracterizadas na fase 1. Como estas argamassas não estavam ainda caracterizadas, decidiu-se por efetuar também caracterização complementar dessas argamassas.

No Quadro 4.1 são apresentados em síntese os objetivos, ensaios e argamassas realizados nas diversas fases de ensaios.

4.2. Fase preliminar de ensaios de contaminação biológica

Face ao conhecimento já adquirido sobre argamassas de cal aérea, esta fase de ensaios preliminares tem como objetivo avaliar o comportamento de argamassas de reboco formuladas com este ligante face ao crescimento biológico. Estes ensaios tiveram ainda como finalidade testar a viabilidade dos procedimentos de ensaio escolhidos.

Além da avaliação de argamassas apenas com cal aérea e areia foram ainda analisadas argamassas com substituição de uma percentagem de cal por terra argilosa e a adição de três tipos diferentes de fibras naturais.

A suscetibilidade biológica foi avaliada tendo em conta também as características mecânicas das argamassas e ao nível de porosidade e massa volúmica que, tal como referido, tinham sido avaliadas em investigações anteriores (Santos, 2014a).

Os resultados obtidos por Santos (2014a) encontram-se sintetizados em anexo.

Quadro 4.1 - Síntese de objetivos, ensaios e argamassas realizados nas diversas fases de ensaios

Fase preliminar		
Objetivos	<ul style="list-style-type: none"> - Avaliação do comportamento de argamassas de cal aérea face ao crescimento biológico - Influência da adição de terra argilosa e três tipos de fibras naturais - Verificação da viabilidade do procedimento de ensaio de contaminação biológica - Comparação das características avaliadas em estudos anteriores 	
Ensaio	- Ensaio de contaminação biológica	
Argamassas	CL2	Cal aérea e areia ao traço volumétrico 1:2
	CL2-25t	Cal aérea e areia ao traço volumétrico 1:2 mas com 25% de massa de cal substituída por terra
	CL2-25t+9ca	Idem à anterior mas com adição de 9% de casca de arroz, face à massa de cal
	CL2-25t+5cc	Idem à anterior mas com adição de 5% de crina de cavalo
	CL2-25t+2rl	Idem às duas anteriores mas com adição de 2% de resíduo de lã
Fase 1		
Objetivos	<ul style="list-style-type: none"> - Avaliação do comportamento de argamassas de terra argilosa face ao crescimento biológico - Influência da introdução de um tipo de fibras naturais e de um material de mudança de fase - Comparação das características avaliadas em estudos anteriores 	
Ensaio	<ul style="list-style-type: none"> - Ensaio de medição de pH - Ensaio de rugosidade - Ensaio de contaminação biológica 	
Argamassas	P	Pré doseada (com fibras e areia fina)
	FS	25% terra + 75% areia fina
	FS_PCM20	25% terra + 55% areia fina + 20% PCM
	CS_PCM20	25% terra + 55% areia grossa + 20% PCM
	CS30_FS45	25% terra + 30% areia grossa + 45% areia fina
	CS30_FS25_PCM20	25% terra + 30% areia grossa + 25% areia fina + 20% PCM
	CS30_FS15_PCM30	25% terra + 30% areia grossa + 15% areia fina + 30% PCM
	CS30_FS45+F5	25% terra + 30% areia grossa + 45% areia fina + 5% (do volume total) de fibras
Fase 2		
Objetivos	<ul style="list-style-type: none"> - Avaliação do comportamento físico, mecânico e de contaminação biológica de argamassas de terra com pequena dosagem de cal aérea - Influência da introdução de cal aérea em argamassa de terra 	
Ensaio	<ul style="list-style-type: none"> - Ensaio de caracterização física e mecânica - Ensaio de medição de pH - Ensaio de rugosidade - Ensaio de contaminação biológica 	
Argamassas	CS30_FS45+F5+CL5	25% terra + 30% areia grossa + 45% areia fina + 5% de fibras (vol. total) + 5% de cal aérea (vol. total)
	CS30_FS15_PCM30+CL5	25% terra + 30% grossa + 15% areia fina + 30% PCM + 5% de cal aérea (vol. total)

4.2.1. Composição e amassadura

As argamassas estudadas foram realizadas no âmbito do desenvolvimento da dissertação de mestrado de Pedro Santos (2014). Essas argamassas têm como base uma argamassa de cal aérea e areia siliciosa com traço volumétrico 1:2 (cal:areia), designada por CL2. As características da cal aérea e da areia siliciosa utilizadas podem ser consultadas em Gameiro *et. al.* (2014). Deste modo, todos os resultados mencionados, relacionados com estas argamassas e que não estejam relacionados com contaminação biológica, são retirados da dissertação citada.

Além da argamassa de referência CL2 foram ainda realizadas mais quatro argamassas. Em todas elas, 25% da massa de cal aérea foi substituída por terra argilosa comercializada pela Sorgila e proveniente da zona da Redinha, Pombal. A granulometria da terra argilosa pode ser consultada em Faria *et. al.* (2013).

Em três dessas argamassas foram ainda adicionadas diferentes fibras naturais. As fibras utilizadas foram casca de arroz, crina de cavalo cortada com dimensões de 1 a 2 cm e resíduo de lã de ovelha. Todos os tipos de fibras utilizados foram adicionados em percentagem elevada e distinta entre si. Como a baridade das fibras era diferente, os volumes incorporados são também bastante diferentes. Assim, a percentagem de fibra foi definida de modo a ser elevada mas a permitir obter argamassas manualmente consideradas como trabalháveis. As percentagens, face à massa de cal, foram de 9% de casca de arroz (CL2-25t+9ca), 5% de crina de cavalo (CL2-25t+5cc) e 2% de resíduo de lã (CL2-25t+2rl).

As fibras naturais foram disponibilizadas por uma fábrica de descasque de arroz, por um picadeiro e por uma fábrica de lavagem e fiação de lã, respetivamente.

A baridade dos constituintes é sintetizada em quadro presente no Anexo A.1.

A denominação de cada argamassa, bem como uma breve descrição da sua composição encontram-se no Quadro 4.2.

Quadro 4.2 - Denominação e composição das diferentes argamassas (Santos, 2014a)

Denominação	Composição
CL2	Cal aérea e areia ao traço volumétrico 1:2
CL2-25t	Cal aérea e areia ao traço volumétrico 1:2 mas com 25% de massa de cal substituída por terra
CL2-25t+9ca	Idem à anterior mas com adição de 9% de casca de arroz, face à massa de cal
CL2-25t+5cc	Idem à anterior mas com adição de 5% de crina de cavalo
CL2-25t+2rl	Idem às duas anteriores mas com adição de 2% de resíduo de lã

A realização de todas as amassaduras teve por base a EN 1015-2 (CEN, 1998). O material seco de cada argamassa foi pesado e homogeneizado na cuba da misturadora mecânica de laboratório. A quantidade de

água utilizada foi a considerada necessária para obter uma boa trabalhabilidade e foi introduzida na cuba nos segundos iniciais da mistura mecânica. A mistura mecânica prolongou-se por 3 minutos, com uma interrupção de 30 segundos para reintegração do material nos bordos da cuba.

O traço em massa e a relação mássica entre a água e o material seco das argamassas encontram-se no Quadro 4.3. Sempre que necessário, ao longo da presente dissertação, serão analisados outros resultados obtidos pelo mesmo autor.

Quadro 4.3 - Denominação, traço em massa, relação água/material seco e consistência das argamassas (Santos, 2014a)

Argamassa	Traço em massa (cal:terra:areia:fibra)	Água/Mat.seco [-]	Consistência [mm]
CL2	1 : 0 : 7.7 : 0	0,20	146,6
CL2-25t	1 : 0.3 : 10.3 : 0	0,20	147,1
CL2-25t+9ca	1 : 0.3 : 10.3 : 0.09	0,23	142,5
CL2-25t+5cc	1 : 0.3 : 10.3 : 0.05	0,23	144,3
CL2-25t+2rl	1 : 0.3 : 10.3 : 0.02	0,26	154,8

4.2.2. Ensaio de contaminação biológica

Para a realização do ensaio de contaminação biológica, foram utilizados os provetes resultantes do ensaio de porosidade aberta, que estiveram 48 horas imersos em água, posteriormente foram secos ao ar e condicionados em laboratório ($20\pm 2^{\circ}\text{C}$ e $65\pm 5\%$ HR). Os provetes eram constituídos por pequenos blocos prismáticos com aproximadamente 4 cm de lado nas faces quadrangulares e cerca de 2 cm de altura.

Foram ensaiados três provetes de cada tipo de argamassa, exceto no caso da argamassa com casca de arroz em que só foi possível obter dois provetes. Para avaliar a resistência à contaminação biológica por bolores seguiu-se metodologia adaptada da Norma Americana ASTM D 5590-00 e já aplicada anteriormente com sucesso neste tipo de avaliação por Martins *et. al.* (2011).

A norma define um método separado em 4 fases: preparação das amostras, inoculação com fungos, exposição a condições adequadas ao desenvolvimento biológico e registo do crescimento observado.

A preparação das amostras consiste na esterilização dos provetes. Na fase de inoculação das amostras com fungos, aplica-se uma camada fina de contaminante, garantindo que a superfície está coberta mas não sobressaturada. Para potenciar o desenvolvimento biológico é definido na norma uma incubação a 28°C de temperatura e 85/90% de humidade relativa (HR) durante quatro semanas. A escala definida para a avaliação do crescimento observado é a apresentada no Quadro 4.4.

Quadro 4.4 - Escala para avaliação de crescimento biológico (Norma Americana ASTM D 5590-00)

Escala	Descrição	Percentagem contaminada
0	Sem crescimento	0%
1	Traços de crescimento	<10%
2	Leve crescimento	10 a 30%
3	Crescimento moderado	30 a 60%
4	Crescimento elevado	>60%

Com base nos passos referidos na norma, explicados anteriormente, seguiu-se o seguinte procedimento:

1. Esterilização dos provetes a ensaiar.
2. Preparação de frascos cilíndricos com meio de malte que serve de base aos provetes.
3. Após esterilização os provetes são colocados nos frascos sobre o meio de malte.
4. Preparação com água destilada de uma suspensão de esporos de *Aspergillus niger*, provenientes da coleção do LNEC.
5. Distribuição pela superfície do provete e do meio de malte de 1ml de solução aquosa em cada provete.
6. Colocação de todos os frascos com os provetes em câmara climática a $22\pm 1^{\circ}\text{C}$ e $70\pm 5\%$ HR.
7. Observação e registo uma vez por semana durante 4 semanas utilizando a escala apresentada no Quadro 4.4.

Os passos 1 a 5 do procedimento mencionado são sempre realizados numa câmara de fluxo laminar, com chama, de modo a que não ocorra nenhuma contaminação indesejada.

A esterilização dos provetes é feita colocando-os numa autoclave por vapor de água durante 20 minutos, retiram-se passadas 24 horas e colocam-se novamente na autoclave a 100°C durante 10 minutos.

O meio de malte referido no ponto 2 é realizado utilizando o seguinte procedimento: dissolve-se 40 g de extrato de malte em pó em 1000 cm^3 de água destilada aquecida. Depois do malte se encontrar totalmente dissolvido, filtra-se a solução por algodão hidrófilo e, devido ao volume perdido durante o aquecimento da solução, complementa-se com água destilada até atingir o volume de 1000 cm^3 . Em seguida, junta-se 20 g de agar e coze-se durante 5 minutos na autoclave a 120°C . Concluídos os 5 minutos o pH da solução é acertado para 7, através de reguladores de pH. Entuba-se e procede-se a esterilização durante 20 minutos na autoclave a 120°C .

Na Figura 4.1 mostram-se alguns provetes no ensaio descrito. No fundo do frasco cilíndrico é possível observar o meio de malte, a cor escura, sobre o qual assentam os provetes.



Figura 4.1 - Alguns provetes no ensaio de contaminação biológica (Teixeira *et al.*, 2014)

Simultaneamente aos ensaios dos provetes em estudo, é verificada a viabilidade da suspensão de esporos através de três provetes de papel de filtro Whatman nº1 que servem de controlo. O papel de filtro é colocado em caixas de *Petri* sobre o meio de malte e contaminado com o mesmo contaminante utilizado nas argamassas. Caso os valores de contaminação biológica sejam elevados estamos perante uma suspensão viável e o ensaio pode ser validado.

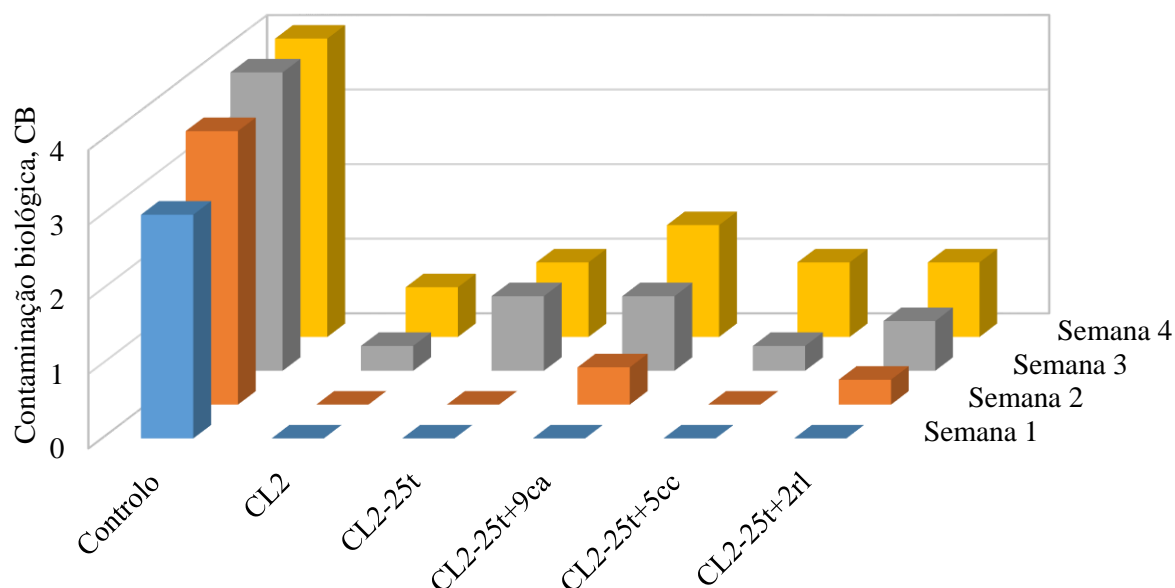
Resultados

Ao longo do período de realização dos ensaios, os provetes são observados semanalmente de modo a perceber como se está a desenvolver o fungo. Esta observação é feita através dos frascos uma vez que estes não podem ser abertos, o que faz deste tipo de observação algo apenas provisório e indicativo. Ao fim das quatro semanas do ensaio os provetes são retirados dos frascos e observados ao microscópio de modo a obter valores finais mais precisos.

Os resultados obtidos são apresentados em forma de gráfico, para melhor visualização e perceção, Figura 4.2. A escala utilizada é: 0=sem crescimento; 1=menos de 10% da superfície de provete; 2=10 a 30%; 3=30 a 60%; 4≥60%.

Nota para o facto de os provetes de controlo se encontrarem no final do período total de ensaio no nível mais elevado de contaminação para a escala definida.

Todas as argamassas estudadas apresentaram alguma resistência ao desenvolvimento do fungo *Aspergillus niger*. De registar que, ao fim de uma semana de ensaio, nenhum dos provetes das diferentes argamassas apresentava quaisquer sinais de contaminação, estando já nessa altura o fungo bem instalado no meio de cultura e apresentando todos os provetes de controlo um grau 3.



Nota: 0=sem crescimento; 1=menos de 10% da superfície de provete; 2=10 a 30%; 3=30 a 60%; 4≥60%.

Figura 4.2 - Resultados dos ensaios de contaminação

Com o decorrer do ensaio foi possível verificar pequenas diferenças entre as várias argamassas. Contudo, o número reduzido de provetes ensaiados (em particular de CL2-25t+9ca) reforça o carácter preliminar do ensaio.

Ao comparar a argamassa de referência (CL2) com a argamassa onde foi adicionada terra, observa-se que essa adição parece não aumentar significativamente a percentagem de contaminação, mantendo-se inferior a 10%.

Nas três argamassas onde se adicionaram fibras naturais ocorreu um pequeno incremento no desenvolvimento do fungo, atingindo valores entre 10 e 30% em alguns dos provetes.

A adição de crina de cavalo à argamassa conduz a resultados diferentes para os três provetes ensaiados, sendo que num caso se obtém até 30% da superfície contaminada, noutro até 10% e noutro caso não apresenta indícios de contaminação. Admite-se que a maior dificuldade de homogeneizar estas fibras na argamassa possa explicar parcialmente este resultado.

Tendo em conta os resultados apresentados e limitação quanto ao número de provetes, pode-se observar que a argamassa mais desfavorável em termos de colonização biológica é a que inclui cal, terra e casca de arroz (CL2-25t+9ca). Esta argamassa apresenta sinais de contaminação nos dois únicos provetes ensaiados. No entanto, um deles apresenta o maior grau de desenvolvimento de todos os provetes em estudo.

Na Figura 4.3 é apresentado o aspeto final dos provetes de dois tipos de argamassas, CL2-25t+5cc e CL2-25t+2rl, no final do ensaio. De salientar, quer a presença da lã, quer da crina é bem evidente.

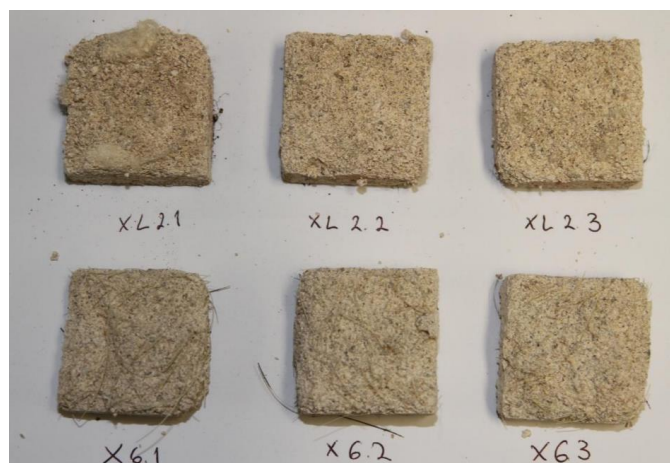


Figura 4.3 - Provetes CL2-25t+2rl e CL2-25t+5cc após ensaio

4.3. Fase 1 de ensaios

Terminada a fase preliminar de ensaio, e verificados os seus resultados, iniciou-se uma nova fase de ensaios. As argamassas estudadas nesta fase 1 foram alvo de caracterização mecânica e física na dissertação de mestrado realizada por Tânia Santos (Santos, 2014b). Sempre que necessário, ao longo da presente dissertação, serão analisados resultados obtidos pelo autor.

Nesta fase o objetivo passa por estudar a suscetibilidade ao crescimento biológico de argamassas de terra argilosa e qual o efeito provocado pela introdução de um tipo de fibras naturais e por um material de mudança de fase.

Assim, além do ensaio de contaminação biológica propriamente dito, são realizados ensaios de medição de rugosidade e de pH.

4.3.1. Composição e amassadura

Foi analisada uma argamassa pré-doseada (P) e foram formuladas outras argamassas com terra do mesmo local da argamassa pré-doseada, com um traço volumétrico base de 1:3 (terra argilosa:areia). A composição de cada argamassa bem como a sua designação encontram-se no Quadro 4.5.

Na constituição das argamassas é utilizada uma mesma terra argilosa, duas areias (areia fina do fabricante e areia branca grossa), um PCM e umas fibras vegetais. A caracterização destes materiais encontra-se em Santos (2014b).

Quadro 4.5 - Composição e designação das argamassas

Argamassas	Composição	Percentagem de água
P	Pré doseada (com fibras e areia fina)	20%
FS	25% terra + 75% areia fina	20%
FS_PCM20	25% terra + 55% areia fina + 20% PCM	20%
CS_PCM20	25% terra + 55% areia grossa + 20% PCM	17%
CS30_FS45	25% terra + 30% areia grossa + 45% areia fina	20%
CS30_FS25_PCM20	25% terra + 30% areia grossa + 25% areia fina + 20% PCM	20%
CS30_FS15_PCM30	25% terra + 30% areia grossa + 15% areia fina + 30% PCM	20%
CS30_FS45+F5	25% terra + 30% areia grossa + 45% areia fina + 5% (do volume total) de fibras	25%

A argamassa pré-doseada P trata-se de uma argamassa comercializada pela EMBARRO, em Portugal e Espanha, que possui, além da terra argilosa como ligante, fibras e areia fina. Nas restantes argamassas o aglomerante utilizado é sempre a argila da terra, variando apenas a proporção de areia fina e grossa e ainda a presença ou ausência de fibras e de PCM. As fibras utilizadas na realização das argamassas são todas provenientes de palha de aveia e os materiais de mudança de fase (PCM), fornecidos pela empresa BASF, são constituídos por um pó à base de *polymethyl methacrylate*, altamente reticulado, misturado com parafinas e microencapsulado.

A baridade dos constituintes é sintetizada em quadro presente no Anexo A.1 e a ficha técnica do material de mudança de fase utilizado apresentada no Anexo A.2. Em anexo é, ainda, apresentada uma síntese dos resultados de caracterização obtidos por Santos (2014b).

A quantidade de água utilizada foi a considerada de modo a que as argamassas apresentassem uma boa trabalhabilidade.

Para os ensaios a realizar foi necessário produzir provetes de argamassa com dimensões de 4 cm x 4 cm x 2 cm sobre o tardo de um pedaço de azulejo vidrado com 4 cm x 4 cm de área de modo a constituir uma base e simular um possível suporte da argamassa. Para cada argamassa foram produzidos 5 provetes de modo a obter resultados médios fiáveis num molde de contraplaco marítimo que permitia produzir provetes de 6 argamassas distintas (Figura 4.4).

A amassadura destas argamassas foi realizada com base na norma DIN 18947 (NABau, 2013), especifica de argamassas de terra. Para a amassadura foi utilizado um misturador mecânico de laboratório com capacidade para 3 litros e seguiu-se o seguinte procedimento: realizou-se a mistura dos componentes secos num tabuleiro e em seguida foram colocados na cuba do misturador. Adicionou-se a água e iniciou-se a misturadora durante 30 segundos. Após este período, a argamassa fica em repouso durante 5 minutos, aos quais se seguem mais 30 segundos de amassadura.



Figura 4.4 - Molde utilizado para produção de fiadas de 5 provetes

Após a colocação das argamassas no molde dos provetes, estas foram sujeitas a condições de temperatura e humidade relativa constantes de $20\pm 2^{\circ}\text{C}$ e $65\pm 5\%$, respetivamente, até que os provetes se encontrassem perfeitamente secos.

4.3.2. Ensaio de rugosidade

O ensaio de rugosidade foi realizado com o aparelho Talysurf CLI 1000, disponibilizado para uso pelo Departamento de Materiais do LNEC. Ainda assim, foi necessário definir algumas condições. Definiu-se que a resolução utilizada na medição seria de 50 nm, a velocidade de arrastamento seria de 15 mm/s e que a frequência do raio seria de 500 Hz, uma vez que se trata de uma superfície opaca. Os valores de resolução e velocidade de arrastamento utilizados foram escolhidos com base em procedimento genérico utilizado no LNEC, tendo em conta o tempo de duração do ensaio.

A velocidade de arrastamento, bem como a resolução utilizadas, são muito importantes uma vez que definem a exatidão do ensaio.

Os resultados obtidos são trabalhados com auxílio do *software* TalyMap Gold e estão de acordo com o definido pela norma ISO 25178-2 (ISO, 2012). Segundo esta norma existem diversos parâmetros capazes de definir a rugosidade de uma superfície tridimensional.

Resultados

Os resultados obtidos para a altura média da superfície, S_a estão apresentados na Figura 4.5. A argamassa que apresentou maior rugosidade foi a CS30_FS45+F5 e a que apresentou menor valor foi a CS30_FS45.

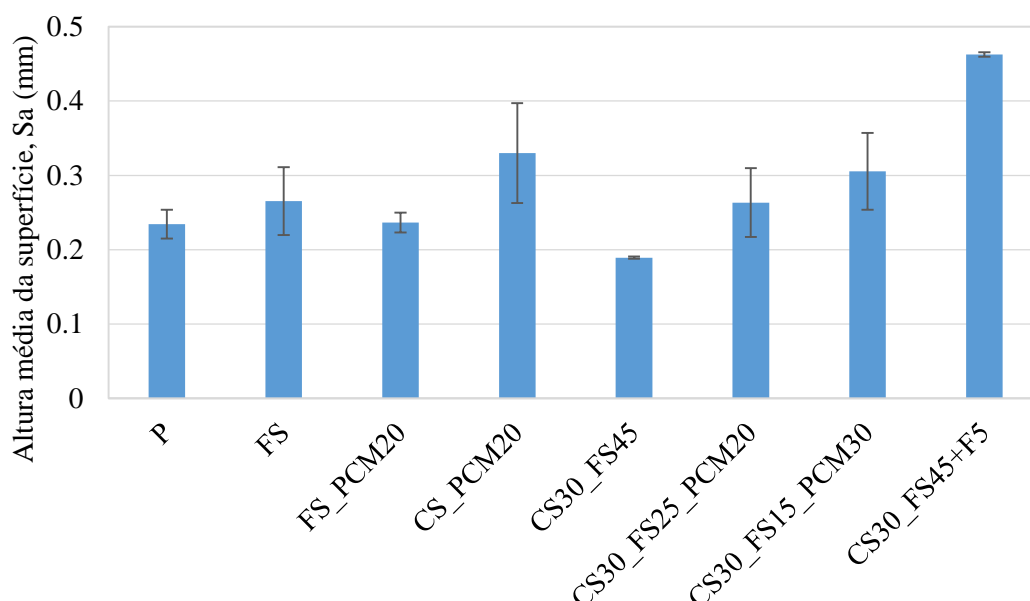


Figura 4.5 - Altura média da superfície

Analisando a rugosidade das argamassas tendo em conta o tipo de areia utilizado é possível observar que uma argamassa composta por areia fina e grossa (CS30_FS45) tem uma rugosidade inferior quando comparada com uma argamassa só com areia fina (FS). Comparando as argamassas FS_PCM20 e CS_PCM20, onde o que varia é o tipo de areia utilizado mantendo-se a mesma percentagem de PCM, verifica-se que a argamassa com areia grossa na sua composição apresenta valores de altura média de superfície mais elevados. No que diz respeito ao tipo de areia utilizado percebe-se que a areia grossa provoca uma maior rugosidade superficial da argamassa relativamente à areia fina. Apesar disso, a junção das duas areias pode, como neste caso, provocar uma diminuição deste fator. Isso pode ser explicado pelo facto de a areia fina preencher os espaços entre os grãos de areia grossa, tornando a superfície mais homogênea.

A adição de PCM com areia fina faz com que a rugosidade diminua relativamente à argamassa sem PCM. No que diz respeito às argamassas com areia grossa, fina e PCM ocorre o contrário. Nestes casos a rugosidade aumenta comparativamente à argamassa CS30_FS45 e esse aumento é mais significativo para a argamassa onde a presença de PCM é maior. Durante a amassadura as argamassas com PCM aparentavam uma consistência com maior teor de ar incorporado e, após endurecimento, ficaram visíveis algumas partículas de PCM à superfície. A libertação de ar incorporado pode explicar o facto de a rugosidade aumentar nas argamassas com PCM.

As argamassas estudadas e que têm presença de fibras (P e CS30_FS45+F5) apresentam resultados opostos. Enquanto a argamassa formulada em laboratório (CS30_FS45+F5) é a que apresenta valores de altura média de superfície mais elevados, ultrapassando os 0,45 mm, a argamassa pré-doseada (P) apresenta o segundo valor mais baixo. Esta diferença pode ser explicada por uma diferente proporção de areias e ainda por diferente tipo e/ou dimensão das fibras utilizadas.

Destaque ainda para o facto de a maioria das argamassas apresentarem valores de desvio padrão bastante elevados o que sugere que entre provetes ensaiados existem algumas diferenças.

Na Figura 4.6 estão os resultados relativos às alturas máximas da superfície, S_z obtidos através do ensaio de medição de rugosidade.

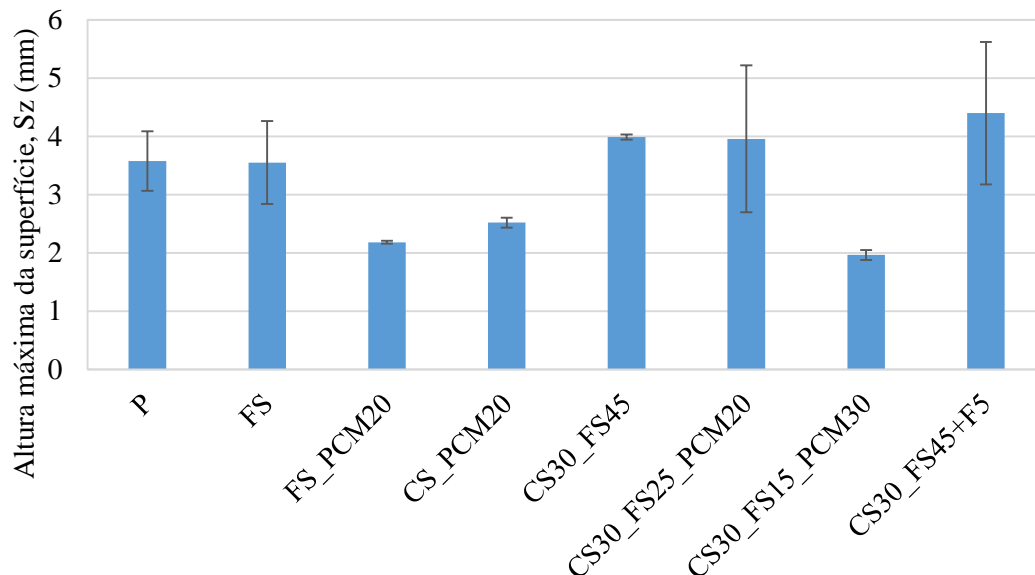


Figura 4.6 - Altura máxima da superfície

Ao contrário do parâmetro S_a que permite definir a rugosidade da superfície, a altura máxima da superfície não reflete se um provete é mais ou menos rugoso do que outro. Este parâmetro representa a maior diferença entre um vale (ponto a baixo da linha média) e um pico (ponto a cima da linha média) e por isso é possível que um provete com uma rugosidade baixa apresente um valor de S_z elevado. Como exemplo disso a argamassa CS30_FS45 apresenta o valor mais baixo de S_a e, no entanto, um valor de S_z próximo do mais elevado.

Este parâmetro é, então, importante, juntamente com o S_a , pois permite compreender melhor as variações que uma superfície pode ter.

Relativamente aos valores obtidos é importante salientar a diminuição ocorrida com a adição de PCM à areia fina (FS_PCM20) e a manutenção da argamassa CS30_FS45+F5 como maior valor registado.

Comparando as argamassas FS_PCM20 e CS_PCM20 destaca-se o facto de, tal como no caso da altura média da superfície, a areia grossa ter registado um valor mais elevado.

Para além dos valores apresentados, através do equipamento é possível obter imagens em duas e três dimensões das superfícies dos provetes ensaiados. As Figura 4.7 e Figura 4.8 mostram a superfície de um provete da argamassa CS30_FS45, obtida em duas e três dimensões. Através da análise destas figuras é possível compreender melhor o porquê das diferenças ocorridas entre S_a e S_z . A superfície do provete é praticamente toda nivelada exceto num dos cantos onde há um grande aumento em altura. Assim, a altura média da superfície é traduzida por um valor baixo enquanto a altura máxima da superfície tem um valor elevado. Nota para o facto de, sempre que necessário, a área de análise da rugosidade foi reduzida de modo a evitar a alteração de dados pelos picos apresentados nas Figura 4.7 e Figura 4.8.

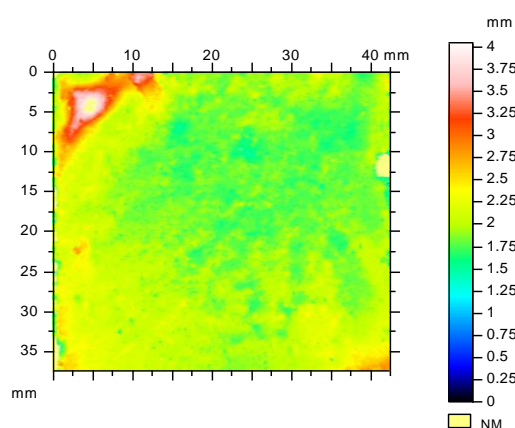


Figura 4.7 - Superfície de um provete da argamassa CS30_FS45 em 2D

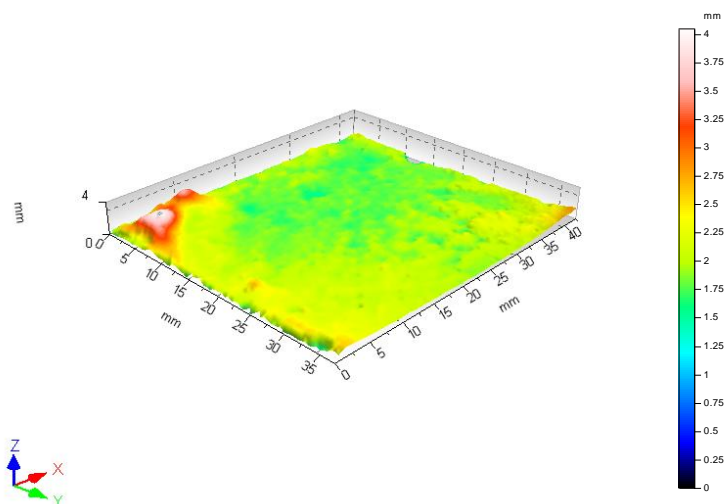


Figura 4.8 - Superfície de um provete da argamassa CS30_FS45 em 3D

4.3.3. Ensaio de medição de pH

Para medição do pH das argamassas em estudo foi utilizado o seguinte procedimento: em frascos de vidro foram misturados 10 g de argamassa em 100 g de água. Para tal as argamassas resultantes do ensaio de resistência à compressão foram desagregadas e moídas e em seguida adicionou-se a água. Após estes serem devidamente misturados, por agitação dos frascos, as soluções aquosas são colocadas na sala condicionada com temperatura de $20 \pm 2^\circ\text{C}$ e HR de $65 \pm 5\%$ durante 24 horas.

Findo este período procede-se à medição do pH. Esta medição é feita com auxílio do aparelho CRISON Basic 20 pH. Este aparelho, através de um eléctrodo colocado na solução a analisar, mede a quantidade de iões de hidrogénio e compara com os valores pré-definidos. Desta maneira, antes de proceder ao ensaio em si, é necessário calibrar o aparelho. Para tal, o eléctrodo é colocado em três amostras previamente realizadas com pH de 4,01, 7 e 9,21.

Depois da calibragem do aparelho, este encontra-se preparado para a realização do ensaio.

Resultados

Os resultados obtidos no ensaio de medição de pH encontram-se esquematizados na Figura 4.9. Através da análise bibliográfica realizada foi possível definir como valores que aumentam a possibilidade de contaminação biológica aqueles que sejam inferiores a 9,5. Esse limite é apresentado na Figura 4.9 através de uma linha horizontal.

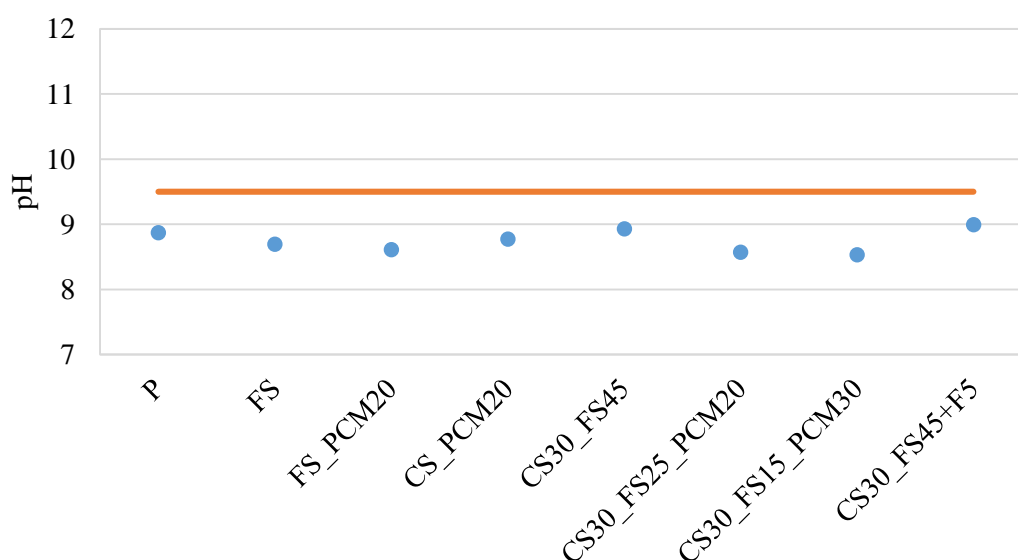


Figura 4.9 - Resultados do ensaio de medição de pH

Pela observação da Figura 4.9 pode-se afirmar que todas as argamassas se encontram com valores de pH propícios para a ocorrência de desenvolvimento biológico. A argamassa com menor pH é a CS30_FS15_PCM30, com um valor de 8,53 enquanto a argamassa com maior pH é a CS30_FS45+F5, com um valor de 8,99.

Ao comparar a argamassa FS com a argamassa FS_PCM20 verifica-se que a adição dos materiais de mudança de fase produz uma ligeira redução do pH. Esta diminuição verifica-se não só para as duas argamassas referidas mas também para as restantes argamassas que possuem PCM. Todas elas apresentam valores inferiores às restantes sendo por isso, exclusivamente do ponto de vista do pH, as argamassas com maior suscetibilidade ao crescimento biológico.

4.3.4. Ensaio de contaminação biológica

Os ensaios de avaliação da suscetibilidade das argamassas na primeira fase de ensaios foram realizados de acordo com o procedimento descrito na fase 0, em 4.2.2.

Resultados

Considerando que para ocorrer degradação é necessário que estejam reunidas condições de humidade e temperatura favoráveis, os ensaios realizados testam os materiais para o caso de ocorrência dessas condições.

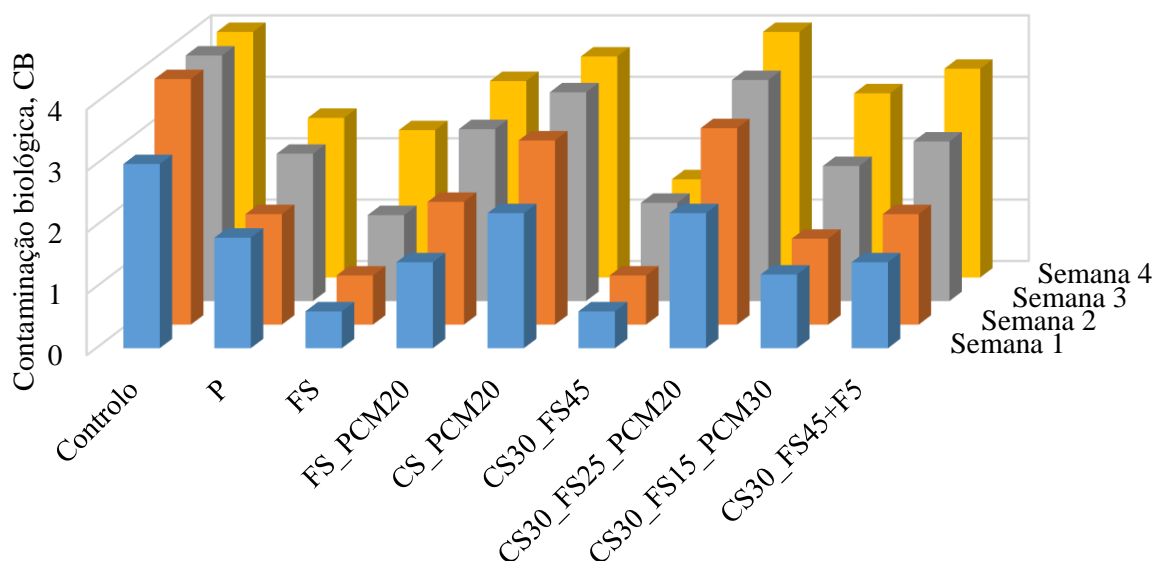
Assim, para as condições de ensaio, a análise da Figura 4.10 permite retirar diversas ilações sobre a maior ou menor probabilidade de ocorrência de contaminação biológica. A escala utilizada é: 0=sem crescimento; 1=menos de 10% da superfície de provete; 2=10 a 30%; 3=30 a 60%; 4≥60%.

Como anteriormente descrito, os resultados dos provetes controlo de papel de filtro permitem validar o ensaio. Neste caso o nível máximo de degradação foi verificado logo às 2 semanas de exposição.

De forma a compreender melhor o que os resultados obtidos significam em termos visuais foram tiradas algumas fotografias com auxílio de microscópio estereoscópico (Figura 4.11).

Em primeiro lugar, analisando o tipo de areia, é possível verificar que a combinação entre areia grossa e fina (CS30_FS45) parece contribuir para uma menor suscetibilidade ao desenvolvimento de fungos quando comparado com uma argamassa só com areia fina (FS). Por outro lado, ao analisar as argamassas FS_PCM20 e CS_PCM20, nota-se que a argamassa que, além do PCM, só tem areia grossa apresenta resultados mais desfavoráveis. Percebe-se então que uma argamassa composta apenas por areia grossa é

mais suscetível à contaminação do que uma argamassa constituída apenas por areia fina. Porém, a mistura das duas areias permite obter uma argamassa mais vantajosa do ponto de vista da contaminação biológica.



Nota: 0=sem crescimento; 1=menos de 10% da superfície de provete; 2=10 a 30%; 3=30 a 60%; 4≥60%.

Figura 4.10 - Resultados do ensaio de contaminação biológica

No que diz respeito à inclusão de PCM nas argamassas é notório o aumento da vulnerabilidade da argamassa, obtendo mesmo o valor mais desfavorável do estudo na argamassa CS30_FS25_PCM20. Analisando as argamassas com PCM juntamente com as argamassas das quais são originárias pode ver-se que, por exemplo, a substituição de 20% de areia fina por PCM na argamassa FS_PCM20 aumentou o risco de contaminação em relação à argamassa FS. No caso da argamassa CS30_FS25_PCM20, criada com base na argamassa CS30_FS45, pode-se observar que a substituição de 20% da areia fina por PCM provoca, tal como referido, um aumento da suscetibilidade da argamassa. Contudo, a substituição de areia por maiores quantidades de PCM teve o efeito contrário. A argamassa CS30_FS15_PCM30 obteve piores resultados comparativamente à argamassa de origem mas melhores em relação à argamassa com 20% de PCM. Apesar das diferenças entre argamassas é importante salientar o mau desempenho deste tipo de argamassas.

Comparando as argamassas com e sem fibras verificou-se nas condições de ensaio que a adição de fibras aumenta, tal como esperado, a biosusceptibilidade das argamassas. Por conseguinte, a argamassa CS30_FS45 obtém valores médios inferiores a 3 (30 a 60%) nos ensaios enquanto a argamassa semelhante mas com adição de 5% de fibras (CS30_FS45+F5) ultrapassa esse valor, aproximando-se do valor máximo de 4 (> 60%) Relativamente à argamassa pré-doseada, apesar de não serem conhecidas as quantidades dos materiais utilizados, sabe-se que tem na sua composição fibras e, por isso, pode ser comparada com as

realizadas em laboratório. Assim, comparativamente com a argamassa CS30_FS45+F5 a argamassa pré-doseada P apresenta melhores resultados. Estes resultados parecem apontar para a necessidade de otimizar a elaboração da argamassa e a definição do traço para um melhor desempenho.

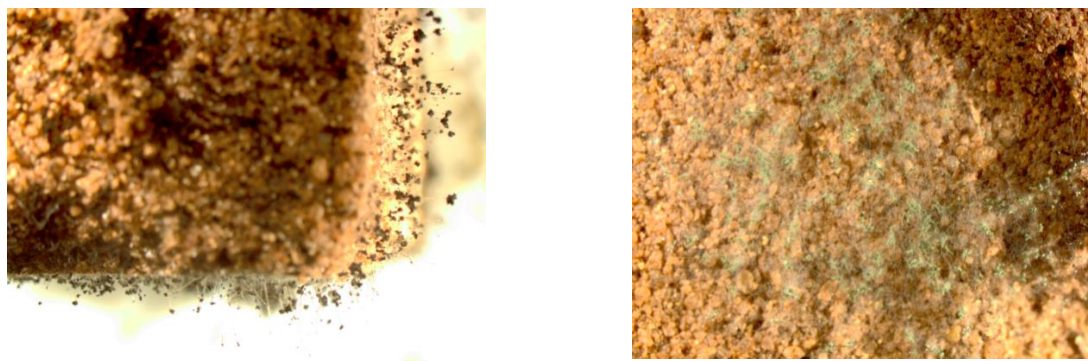


Figura 4.11 - Exemplos de contaminação biológica nas argamassas FS_PCM20 e CS30_FS45, respetivamente

Além de toda a análise realizada é ainda importante referir os resultados obtidos para cada provete da argamassa CS30_FS45. Tal como em todas as argamassas estudadas, foram realizados ensaios em 5 provetes. No entanto, ao contrário dos resultados obtidos para as restantes argamassas, os resultados não foram semelhantes em todos os provetes. Isto é, nos 5 provetes ensaiados foram obtidas duas vezes o resultado 3, uma vez o resultado 2 e duas vezes o resultado 0. Se entre os resultados 2 e 3 a diferença não é significativa, o mesmo não se pode dizer para o caso dos resultados 0. Isto indica que a argamassa em questão tem alguma variabilidade no que diz respeito à sua suscetibilidade à contaminação biológica.

4.4. Fase 2 de ensaios

Com os resultados obtidos pelas duas fases anteriores definiu-se uma nova fase de ensaios. Nesta fase, ao contrário da fase preliminar onde o ligante maioritário era a cal aérea e da fase 1 onde o ligante era apenas a terra argilosa, o ligante maioritário é a terra argilosa mas com uma pequena percentagem de cal aérea.

Como tal, o objetivo principal desta fase de ensaios passa por compreender qual o efeito dessa introdução de cal aérea em termos da redução da suscetibilidade à contaminação biológica.

Uma vez que as argamassas realizadas não tinham sido caracterizadas complementarmente, como as anteriores, foram também incluídos nesta fase outros ensaios de caracterização das argamassas realizadas. Deste modo, será também possível perceber quais as alterações que a introdução da cal aérea promove nessas propriedades.

4.4.1. Composição e amassadura

As argamassas realizadas têm por base as argamassas CS30_FS15_PCM30 e CS30_FS45+F5 da fase de ensaios 1 anterior. À composição definida para essas argamassas foi adicionado 5% do volume total de cal aérea, criando assim as argamassas CS30_FS45+F5+CL5 e CS30_FS15_PCM30+CL5. A baridade dos constituintes é sintetizada em quadro presente no Anexo A.1. A escolha desta argamassas teve como base o facto de, tal como se verificou no subcapítulo relativo à fase 1, a presença de PCM e fibras aumentarem a suscetibilidade à contaminação biológica. A denominação de cada argamassa, bem como a sua composição, são apresentados no Quadro 4.6.

Quadro 4.6 - Composição e denominação das argamassas

Argamassas	Composição	Percentagem de água
CS30_FS45+F5+CL5	25% terra + 30% areia grossa + 45% areia fina + 5% de fibras (vol. total) + 5% de cal aérea (vol. total)	25%
CS30_FS15_PCM30+CL5	25% terra + 30% grossa + 15% areia fina + 30% PCM + 5% de cal aérea (vol. total)	20%

A amassadura, tal como já foi referido, foi realizada com base na norma DIN 18947 (NABau, 2013) para argamassas de terra. Assim, foram efetuadas misturas dos constituintes no estado seco e em seguida a mistura é colocada na cuba juntamente com água. A quantidade de água adicionada foi a necessário para que se considerassem os valores obtidos no ensaio de consistência por espalhamento admissíveis e as argamassas trabalháveis.

As argamassas foram sujeitas a ensaios de caracterização no estado fresco e foram ainda realizados provetes para ensaios das argamassas no estado endurecido.

4.4.2. Ensaio às argamassas no estado fresco

Os ensaios às argamassas no estado fresco foram realizados após a amassadura. Foi realizado o ensaio de consistência por espalhamento de modo a aferir a trabalhabilidade da argamassa e calculada a massa volúmica de cada argamassa.

4.4.2.1. Consistência por espalhamento

O espalhamento quantifica a consistência e, de algum modo, a influência da água na trabalhabilidade de uma argamassa. Através destes valores é possível saber a quantidade de água necessária de modo a que a

argamassa seja considerada trabalhável. Considerou-se que, para as argamassas em análise, os valores de espalhamento admissíveis situam-se na ordem dos 175 ± 5 mm.

O ensaio para medição do espalhamento realizou-se com base na norma EN 1015-3 (CEN, 1999). Assim sendo, em primeiro lugar, verificou-se se a mesa de espalhamento se encontrava devidamente limpa e a funcionar corretamente. De seguida, colocou-se o molde cónico truncado, devidamente humedecido, centrado na mesa de espalhamento. Preencheu-se o molde com duas camadas de argamassa sendo que cada camada foi compactada 20 vezes com o auxílio de um pilão. O excesso de material é retirado utilizando uma colher de pedreiro para rasurar a superfície.

Após esta preparação, o molde é retirado e são aplicadas 15 quedas da mesa em 15 segundos.

Por último, com o auxílio de uma craveira digital, são medidos dois diâmetros ortogonais da argamassa espalhada (Figura 4.12).



Figura 4.12 - Compactação da argamassa no molde (a), molde rasurado (b) e espalhamento após retirar molde (c).

Resultados

A quantidade de água que uma determinada argamassa pré-doseada necessita deve ser definida pelo fabricante de modo a que o espalhamento cumpra o definido pelas normas adequadas.

O Quadro 4.7 apresenta os valores médios das três leituras efetuadas e ainda os respetivos desvio-padrão obtidos para a consistência por espalhamento das argamassas estudadas nesta fase

Quadro 4.7 - Resultados do ensaio de consistência por espalhamento

Argamassa	Consistência por espalhamento (mm)
CS30_FS45+F5+CL5	175.0 ± 1.0
CS30_FS15_PCM30+CL5	176.7 ± 0.6

As argamassas obtiveram valores semelhantes e com variação nas medições bastante reduzida.

4.4.2.2. Massa volúmica fresca

A massa volúmica traduz uma relação entre a massa de uma argamassa e o volume que esta ocupa.

O ensaio para determinação da massa volúmica teve por base a norma EN 1015-6 (CEN, 1998). Para a sua realização é utilizado um recipiente com um volume de 1dm^3 . Inicialmente o recipiente é pesado numa balança com precisão de 0,1g. Posteriormente, este recipiente é preenchido com a argamassa e rasurado com o auxílio de uma colher de pedreiro. O preenchimento do recipiente é feito em duas fases sendo que no final de cada uma é feita uma oscilação e queda do recipiente de modo a compactar a argamassa. Por fim, o conjunto molde e argamassa é pesado.

O valor de massa volúmica é obtido através do quociente entre a diferença de massas do molde, com e sem argamassa, e o volume do molde.

Resultados

No Quadro 4.8 é possível observar os resultados obtidos no ensaio de medição de massa volúmica.

Quadro 4.8 - Resultados do ensaio de medição da massa volúmica

Argamassa	Massa volúmica (kg/dm^3)
CS30_FS45+F5+CL5	1,928
CS30_FS15_PCM30+CL5	1,609

A comparação entre as argamassas mostra que a argamassa que tem na sua composição fibras possui uma massa volúmica superior à argamassa que tem PCM.

4.4.3. Ensaio às argamassas no estado endurecido

A preparação dos moldes para ensaios às argamassas no estado endurecido teve início após conclusão dos ensaios em estado fresco.

Para realizar todos os ensaios previstos, e descritos a seguir, foram produzidos provetes prismáticos de 4 cm x 4 cm x 16 cm, e provetes de 4 cm x 4 cm x 2 cm (estes do tipo já referido na fase 1). Para cada argamassa foram produzidos 3 provetes do primeiro tipo e 5 provetes do segundo.

Os provetes prismáticos foram realizados em moldes metálicos com auxílio de uma mesa de compactação e no final regularizados.

Após conclusão do preenchimento dos moldes estes foram colocados numa sala condicionada a temperatura de $20 \pm 2^\circ\text{C}$ e $65 \pm 5\%$ de HR.

A sequência de ensaios seguida é a demonstrada na Figura 4.13.

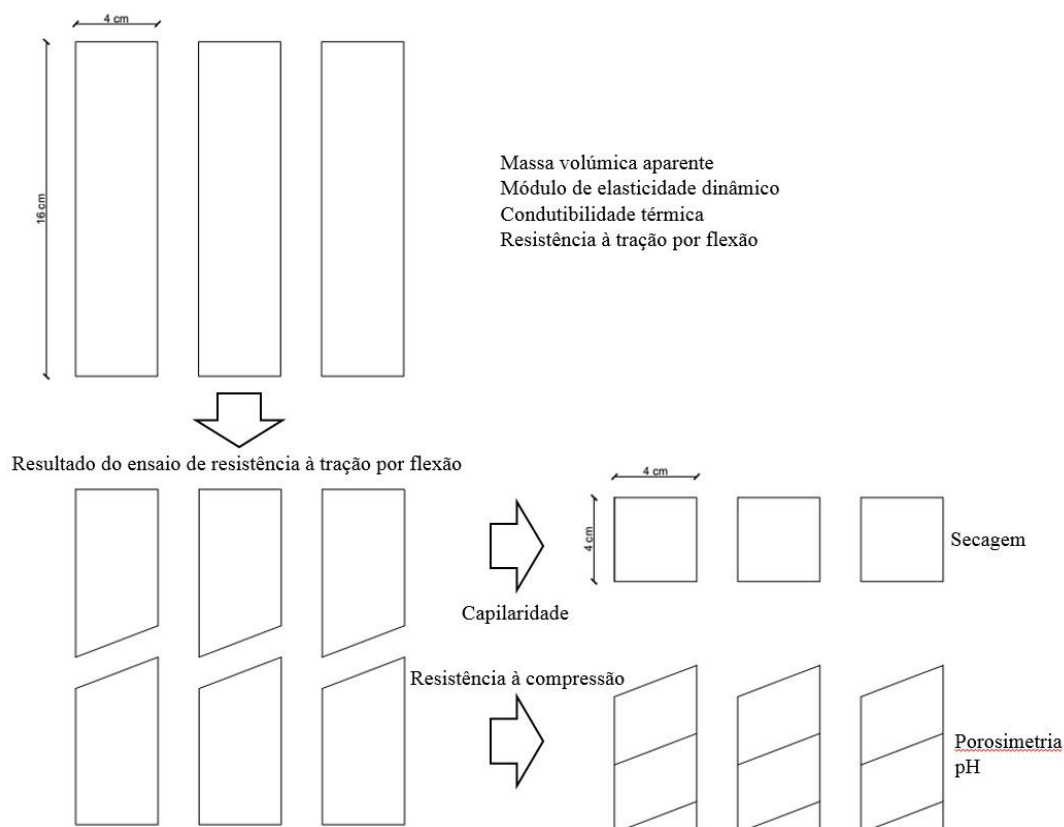


Figura 4.13 – Sequência de ensaios no estado endurecido

4.4.3.1. Condutibilidade térmica

O ensaio de condutibilidade térmica é realizado com o equipamento ISOMET 2104 (Heat Transfer Analyser) e a respetiva sonda de superfície API 210412, aos 30 dias de idade das argamassas. O procedimento seguido foi baseado no descrito no manual do equipamento. O funcionamento deste aparelho baseia-se na emissão de um fluxo térmico através da sonda. A resposta do material a estes impulsos é avaliada pelo aparelho.

Na realização do ensaio, os provetes prismáticos são colocados sobre uma placa de XPS, de forma a garantir uma homogeneidade da fronteira inferior, e sobre estes é colocada a sonda de superfície. Como estes provetes têm dimensões de 4x4x16 cm, garante-se a espessura mínima de 2cm. Contudo, uma vez que o diâmetro da sonda é de 6cm e a largura da face em contacto apenas possui 4cm, uma parte da sonda

fica fora do provete. Assim, os resultados obtidos só podem ser comparados entre argamassas estudadas e ensaiadas nas mesmas condições, a partir do mesmo tipo de provetes.

Foram efetuadas medições em 3 faces de cada provete (Figura 4.14) e o valor de condutibilidade térmica, expresso em W/m.K, corresponde à média dos valores obtidos.

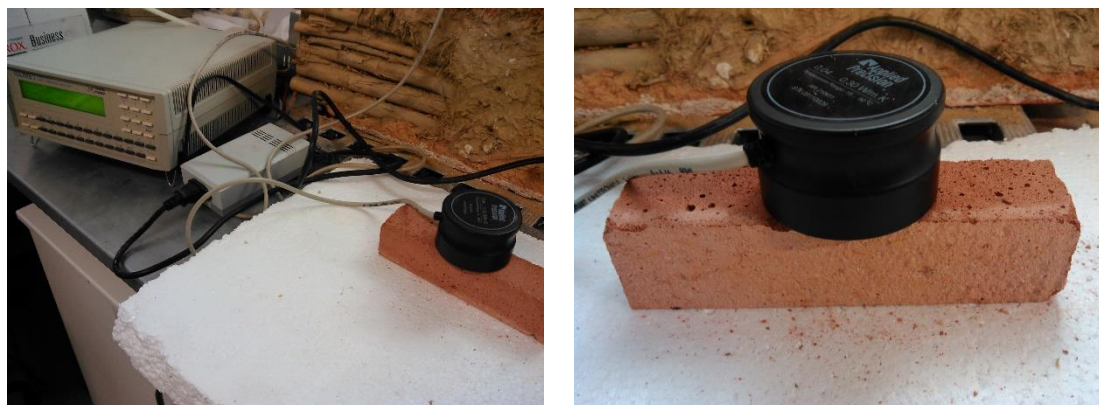


Figura 4.14 - Equipamento utilizado para determinação de condutibilidade térmica (a) e sonda utilizada no ensaio (b).

Resultados

Os resultados médios e desvio-padrão obtidos no ensaio de medição da condutibilidade térmica das argamassas encontram-se no Quadro 4.9.

Quadro 4.9 - Resultados do ensaio de medição da condutibilidade térmica

Argamassa	Condutibilidade térmica (W/m.K)	DP (W/m.K)
CS30_FS45+F5+CL5	0,576	0,018
CS30_FS15_PCM30+CL5	0,367	0,017

A argamassa que contém PCM na sua constituição apresenta um valor de condutibilidade térmica inferior à argamassa que contém fibras.

4.4.3.2. Massa volúmica aparente

A massa volúmica aparente é obtida através do quociente entre a massa do provete endurecido e o seu volume. Utilizando uma craveira digital mediu-se o comprimento, a altura e a largura de cada um dos provetes. Foram feitas medições em 2 pontos e o valor utilizado para o cálculo do volume é obtido através da média das medições. Em seguida pesaram-se os provetes numa balança de precisão 0,001g. Com os

valores obtidos de massa e volume foram calculadas as massas volúmicas para cada provete, aos 30 dias de idade.

Resultados

Os valores médios e desvio-padrão obtidos para a massa volúmica encontram-se resumidos no Quadro 4.10. Neste caso, tal como na massa volúmica no estado fresco, a argamassa CS30_FS45+F5+CL5 apresenta um valor mais elevado quando comparado com a argamassa com PCM. Por sua vez, é possível também verificar que o ensaio de massa volúmica aparente, realizado no estado endurecido, apresenta, obviamente, valores inferiores aos obtidos para a massa volúmica no estado fresco devido à secagem entretanto ocorrida.

Quadro 4.10 - Resultados do ensaio de medição da massa volúmica aparente

Argamassa	Massa volúmica aparente (kg/dm³)	DP (kg/dm³)
CS30_FS45+F5+CL5	1,671	0,005
CS30_FS15_PCM30+CL5	1,435	0,003

Apesar de o ensaio ter seguido o procedimento adequado, os valores apresentados não são 100% corretos já que os provetes se mostraram bastante friáveis, o que implicou algumas perdas de massa durante o manuseamento.

4.4.3.3. Módulo de elasticidade dinâmico

O módulo de elasticidade dinâmico quantifica a capacidade que uma determinada argamassa tem para absorver deformações. Consequentemente, na escolha de uma argamassa é importante ter em conta este parâmetro. Através desta propriedade é possível caracterizar uma argamassa quanto à resistência, à fendilhação e compatibilidade com o suporte.

Na determinação do módulo de elasticidade dinâmico utilizaram-se os métodos descritos na norma NP EN 14146 (IPQ 2007), definida para pedrais naturais.

Para a realização do ensaio foram retirados os provetes, um por um, da sala condicionada ($22\pm 2^{\circ}\text{C}$ e $65\pm 5\%$) e colocados no suporte do equipamento “ZEUS Resonance Meter” (ZRM001). Uma extremidade do provete fica em contacto com o emissor de ultrassons enquanto a outra fica em contacto com o recetor.

As leituras para o módulo de elasticidade são obtidas utilizando um programa computacional adequado ao equipamento. Para que o programa calcule os valores pretendidos é necessário inserir as dimensões do

provetes a ensaiar, bem como a sua massa. Os valores utilizados foram obtidos em 4.4.3.2. De modo a cobrir todo o provete são realizadas quatro medições, duas em cada face extrema.

Os valores de módulo de elasticidade dinâmico são determinados com base na seguinte fórmula:

$$Ed = (2 \times L \times f_0) \times \frac{\rho}{g} \times 10^{-6} \quad [MPa]$$

Onde L – comprimento do provete [m]; f_0 – frequência de ressonância longitudinal [Hz]; ρ – peso específico [N/m^3]; g – aceleração da gravidade [m/s^2].



Figura 4.15 - Equipamento utilizado na medição do módulo de elasticidade dinâmico com provete em ensaio.

Resultados

Com a realização do ensaio de determinação do módulo de elasticidade dinâmico são obtidos diversos valores, os quais necessitam de ser devidamente tratados. Assim, os resultados médios e desvio-padrão finais são os apresentados no Quadro 4.11.

Quadro 4.11 - Resultados do ensaio do módulo de elasticidade dinâmico

Argamassa	Módulo de elasticidade dinâmico (MPa)	DP (MPa)
CS30_FS45+F5+CL5	1577,29	131,17
CS30_FS15_PCM30+CL5	1183,18	30,72

4.4.3.4. Resistências à tração por flexão e à compressão

Foi realizado o ensaio por resistência à tração por flexão, com base na norma EN 1015-11 (CEN,1999).

Na realização do ensaio foi utilizada a máquina universal Zwick/Roweel, na qual se introduziu a célula de carga de 2 kN. De seguida colocou-se um provete no equipamento, sobre dois apoios afastados entre si em 100 mm, e deu-se início ao ensaio (Figura 4.16). A colocação do provete é feita cuidadosamente, uma vez que é importante que este fique centrado em relação à célula de carga. Além disso é necessário, também, garantir que a face mais rugosa não está em contacto nem com a célula de carga nem com os apoios. Deste

modo é possível eliminar alguns erros derivados da irregularidade dessa face. Utilizando um *software* próprio, num computador ligado ao equipamento, foi definido que o ensaio ocorreria a uma velocidade constante de 0,2 mm/min. No mesmo *software* é ainda possível observar a variação da força aplicada em relação ao tempo e obter a força máxima aplicada que levou à rotura do provete.

De modo a obter a resistência à tração por flexão, a norma utilizada define a seguinte expressão:

$$R_t = 1,5 \times \frac{F_f \times l}{b \times d^2} [MPa]$$

Onde l – distância entre apoios [mm]; b e d – lado da secção quadrada do provete [mm]; F_f – Força máxima aplicada obtida pelo *software* [N].



Figura 4.16 - Equipamento e disposição do provete no ensaio de resistência à tração por flexão.

Concluída a realização do ensaio descrito, resultam duas metades de cada provete. Uma das metades é utilizada para os ensaios de capilaridade e secagem enquanto a outra metade é utilizada para o ensaio de resistência à compressão.

O ensaio de resistência à compressão decorreu com base na norma EN 1015-11 (CEN 1999).

Tal como no ensaio de tração por flexão, foi utilizada a máquina universal Zwick/Rowell. Contudo, foi utilizada uma célula de carga de 50 kN. Os meios provetes são colocados deitados no aparelho e, tal como no caso anterior, a face rugosa é colocada de lado de modo a reduzir o erro. Através do *software* é definida uma velocidade constante de 0,7 mm/min e são observados os gráficos que relacionam a força aplicada em função do tempo, bem como a força máxima de compressão F_c .

A resistência à compressão é obtida, em MPa, pelo quociente de F_c (em N) pela área de carga (com cerca de 40 mm x 40 mm) (Figura 4.17).



Figura 4.17 - Equipamento e metade dos provetes iniciais no ensaio de resistência à compressão.

Resultados

As resistências à tração por flexão (R_t) e à compressão (R_c) obtidas são apresentadas na Figura 4.18.

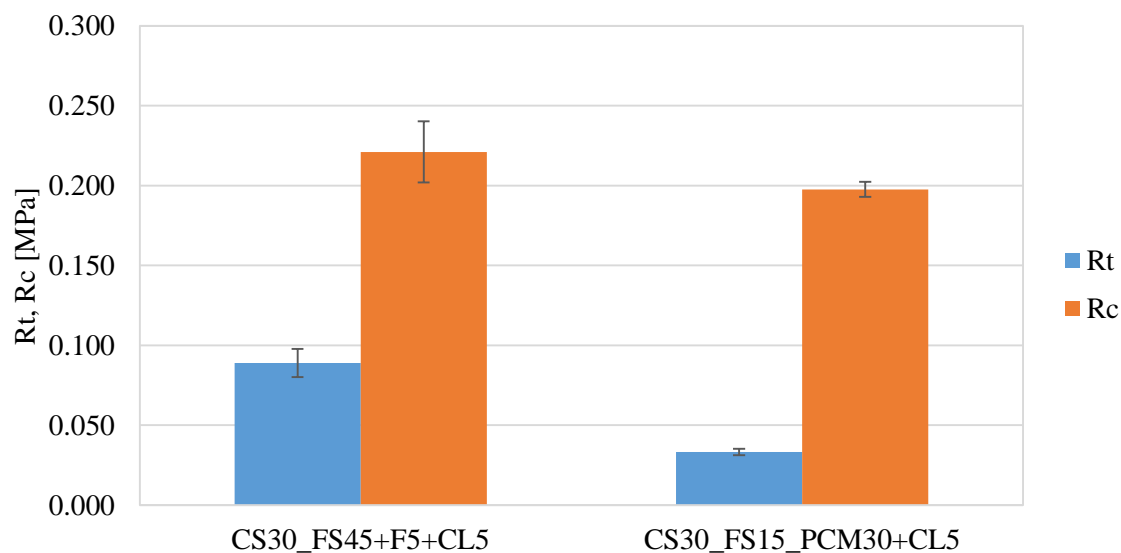


Figura 4.18 - Resultados dos ensaios de resistência à tração por flexão e compressão

Pela análise da figura salienta-se o facto de a argamassa que possui fibras apresentar maiores valores de resistência mecânica. No caso da resistência à compressão a diferença entre as argamassas é menor do que para a resistência à tração por flexão.

4.4.3.5. Absorção de água por capilaridade

O ensaio que será descrito em seguida foi realizado com base nas normas EN 1015-18 (CEN, 2002) e EN 15801 (CEN, 2009) e teste nºII.5 da RILEM (RILEM 1980), com ligeiras adaptações.

A capilaridade determina em parte a suscetibilidade à deterioração, pois influencia a durabilidade da argamassa e a proteção do suporte. Com a realização deste ensaio pretende-se determinar o coeficiente de capilaridade (CC) e o valor assintótico (VA). O coeficiente de capilaridade traduz a velocidade de absorção inicial e é determinado pelo declive do troço inicial da curva de absorção capilar. Por sua vez, o valor assintótico corresponde ao valor máximo de água absorvida por área de contacto com água.

Para o ensaio de absorção de água por capilaridade foram utilizadas metades dos provetes obtidos após o ensaio de resistência à tração por flexão. Estas metades foram cortadas em cubos com 40 mm de aresta.

Já cortados, os provetes foram colocados em estufa a 60°C durante 48 horas de modo a que fiquem completamente secos, com massa constante. Após este período as faces laterais foram cobertas por resina de modo a torná-las impermeáveis e a garantir que a entrada de água no provete apenas ocorre na face inferior e a secagem pela parte superior, sendo unidirecional. Depois de colocada a resina os provetes são deixados ao ar até a resina secar e mantidos novamente em estufa durante 24 horas.

Antes de iniciar o ensaio, nos provetes já cobertos com resina, são colocados panos presos com elásticos na base. Estes panos impedem que o material do provete se desagregue, tornando impossível a realização do ensaio. Para facilitar a pesagem e manipulação dos provetes, estes são colocados dentro de pequenas caixas construídas com rede, como mostra a Figura 4.19.

O ensaio de absorção de água por capilaridade é realizado em sala condicionada a $20\pm 2^{\circ}\text{C}$ e $65\pm 5\%$ de HR.

Para iniciar o ensaio, são pesados os provetes secos e as caixas de rede de modo a que depois possa ser calculado o aumento de massa dos provetes. Em seguida, os conjuntos provete + caixa de rede são também pesados e colocados numa caixa plástica grande. Essa caixa tem água no fundo de modo a garantir que no seu interior exista um ambiente saturado. Dentro da caixa é colocado um tabuleiro metálico, nivelado, com uma rede plástica no fundo. Este tabuleiro assenta sobre um tijolo de modo a que fique sobrelevado em relação à água existente no fundo e dentro dele é colocada água até atingir uma altura de 5 mm. Esta lâmina de água é mantida durante todo o ensaio e, por isso, durante o decorrer deste é necessário ir adicionando água. Os provetes, já preparados, são colocados dentro do tabuleiro e a caixa plástica de grandes dimensões é fechada. As massas dos provetes são registadas aos 2, 4, 6, 8, 10, 20, 30 e 60 minutos e depois de hora a hora até a curva de absorção capilar estabilizar. Para minimizar os erros das pesagens é necessário ter o cuidado de deixar escorrer a água em excesso antes da pesagem e ainda retirar os provetes sem que estes pinguem sobre os restantes. Destaca-se o facto de, ao fim de 30 minutos, todos os provetes se encontrarem com a superfície superior completamente molhada.

Com as pesagens registadas é possível determinar a curva de absorção de água por capilaridade. Esta curva é expressa num gráfico que relaciona a quantidade de água absorvida por área da base do provete (kg/m^2) com a raiz quadrada do tempo ($\text{min}^{1/2}$).

Assim, a quantidade de água absorvida (M) é dada pela seguinte expressão:

$$M = \frac{m_i - m_0}{A} \quad [kg/m^2]$$

Onde m_i – massa do provete num determinado instante [kg]; m_0 – massa do provete seco [kg]; A – área da superfície do provete em contacto com água [m²].

O coeficiente de capilaridade (CC) pode ser obtido através de uma regressão linear dos pontos do segmento inicial da curva, utilizando para tal o declive (m) da reta formada por esses pontos.

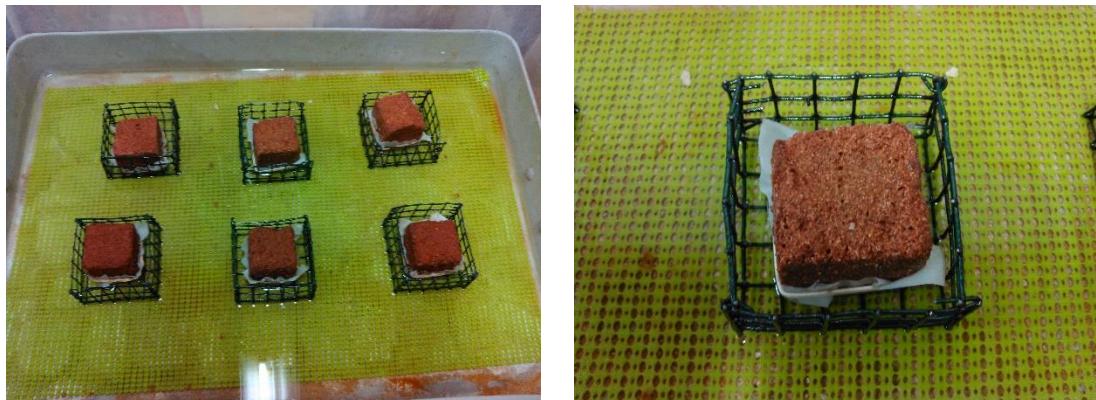


Figura 4.19 - Provete no ensaio de absorção de água por capilaridade

Resultados

A Figura 4.20 apresenta as curvas de capilaridade das argamassas CS30_FS45+F5+CL5 e CL30_FS15_PCM30+CL5.

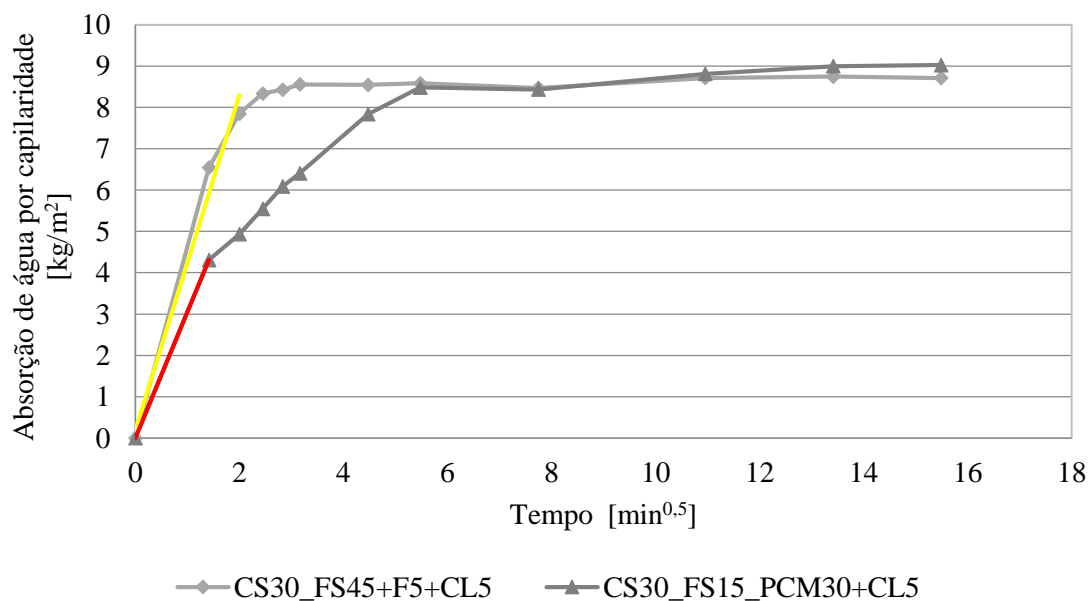


Figura 4.20 - Curvas de capilaridade de ambas as argamassas estudadas

Como explicado, a medição de quantidade de água absorvida por capilaridade foi efetuada até que se atingisse a estabilização. Os segmentos de reta, coloridos, existentes na figura representam os valores utilizados no cálculo do coeficiente de capilaridade.

Em ambas as curvas é possível observar que, apesar de os troços iniciais não seguirem o mesmo padrão, a curva em si descreve o efeito típico. Ao comparar as argamassas entre si é também perceptível a maior velocidade de absorção inicial ocorrida para a argamassa que contém fibras.

No Quadro 4.12 são apresentados os valores obtidos para o coeficiente de capilaridade e valor assintótico.

Quadro 4.12 - Valores assintóticos e coeficientes de capilaridade

Argamassa	Valor Assintótico [kg/m ²]	DP [kg/m ²]	Coeficiente de Capilaridade [kg/(m ² .min ^{0.5})]	DP [kg/(m ² .min ^{0.5})]
CS30_FS45+F5+CL5	8,74	0,20	4,63	0,05
CS30_FS15_PCM30+CL5	9,02	0,14	3,05	0,28

Os valores assintóticos das argamassas em estudo são bastante semelhantes entre si. Contudo, é a argamassa com incorporação de PCM que apresenta um maior valor. Ou seja, a argamassa com presença de PCM absorve uma maior quantidade total de água quando comparada com a argamassa que contém fibras. Relativamente ao coeficiente de capilaridade, o maior valor é alcançado pela argamassa com fibras. Pela análise da Figura 4.20, e como referido anteriormente, já era expectável que tal acontecesse uma vez que o coeficiente de capilaridade traduz a velocidade com que a absorção ocorre nos instantes iniciais.

4.4.3.6. Secagem

O ensaio de secagem foi realizado imediatamente a seguir ao ensaio de absorção de água por capilaridade tendo por base o Test No. II.5 “Evaporation curve” da RILEM (1980) e a norma NORMAL 29/88 (1988). Este ensaio, tal como o anterior, decorreu em sala condicionada, com temperatura de $20 \pm 2^\circ\text{C}$ e HR de $65 \pm 5\%$.

Os provetes que se encontravam na caixa utilizada para os ensaios de capilaridade foram retirados, pesados e colocados em caixas de Petri (Figura 4.21). Tal como explicado anteriormente, a resina utilizada impede que a evaporação ocorra pelas faces laterais, obrigando a que esta seja apenas pela face superior.

No primeiro dia de realização do ensaio, os provetes são pesados de hora a hora durante 5 horas e em seguida são pesados a cada 24 horas até à estabilização da massa.



Figura 4.21 - Provetes no ensaio de secagem

Ao longo das pesagens, de modo a acompanhar a evaporação ao longo do tempo, efetuou-se a curva de secagem.

A curva de secagem é descrita pelo gráfico que relaciona o teor de água (%) com o tempo (h). O teor em água é obtido através da equação seguinte:

$$W_t = \frac{m_i - m_0}{m_0} \times 100 \quad [\%]$$

onde m_i – massa do provete no instante i [kg]; m_0 - massa do provete seco [kg].

O índice de secagem (IS) é um parâmetro qualitativo obtido através de uma equação trabalhada por Brito *et al.* (2011) e Grilo *et al.* (2014), com base numa norma italiana.

$$IS = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} (t_i - t_{i-1}) \times \frac{W_{i-1} + W_i}{2}}{W_{m\acute{a}x} \times t_f}$$

onde t_i – tempo de ensaio [h]; t_f – tempo final de ensaio [h]; W_i – teor em água no instante i [%]; $W_{m\acute{a}x}$ – teor de água inicial [%].

A mesma curva também pode ser expressa pela água retida em função da área (em kg/m²) pelo tempo (h). Nesse caso a taxa de secagem (TS, em kg/m².h) corresponde ao declive do troço inicial da curva de secagem em função do tempo.

Resultados

As curvas de secagem obtidas para as argamassas em estudo são apresentadas na Figura 4.22. Tal como no caso da capilaridade, as medições foram efetuadas até ocorrer estabilização de massa.

Em ambas as argamassas a curva seguiu um padrão semelhante: inicialmente ocorre uma quebra mais acentuada do teor de água até que com o decorrer do tempo a variação vai diminuindo até estabilizar. A diminuição mais acentuada ocorrida inicialmente é explicada pelo facto de na primeira fase da secagem, a evaporação ocorrer à superfície, sendo aí que se localiza a frente de secagem. Dessa forma, a secagem é

mais rápida e a taxa de secagem é constante ao longo do tempo. À medida que o teor de água do material diminui, o fluxo capilar já não é suficiente para compensar a evaporação, fazendo com que a frente de secagem recue para o interior do provete. Assim, o transporte de água até à frente de secagem ocorre por capilaridade e por difusão de vapor. O recuo progressivo da frente húmida aumenta o percurso de difusão do vapor, levando a uma secagem cada vez mais lenta (Brito *et al*, 2011).

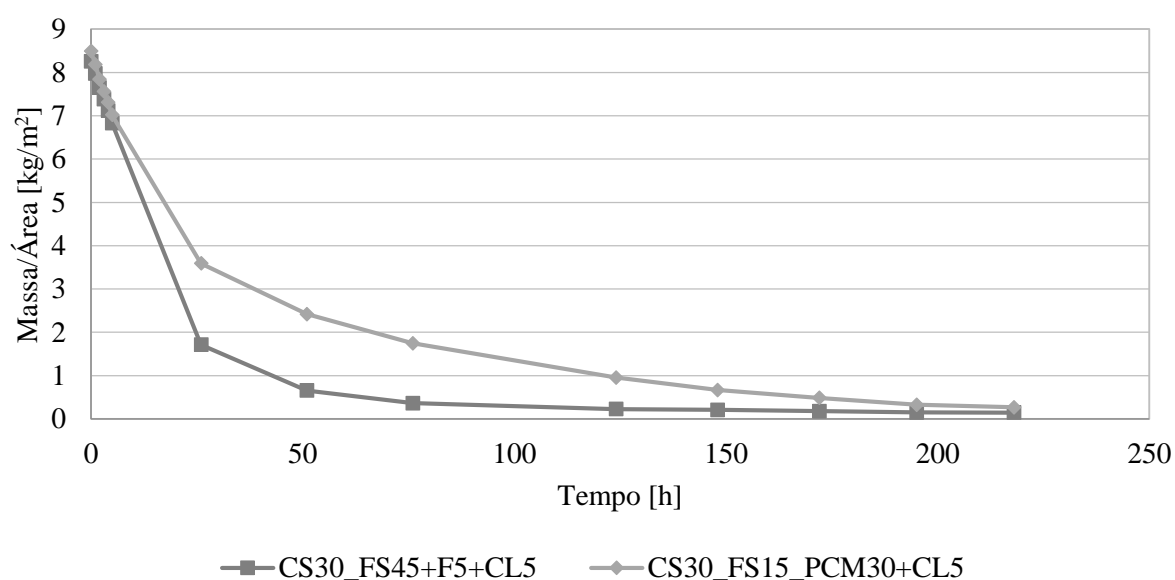


Figura 4.22 - Curvas de secagem referentes às argamassas em estudo

Os segmentos de reta, coloridos, existente na Figura 4.23 representam os valores utilizados no cálculo da taxa de secagem.

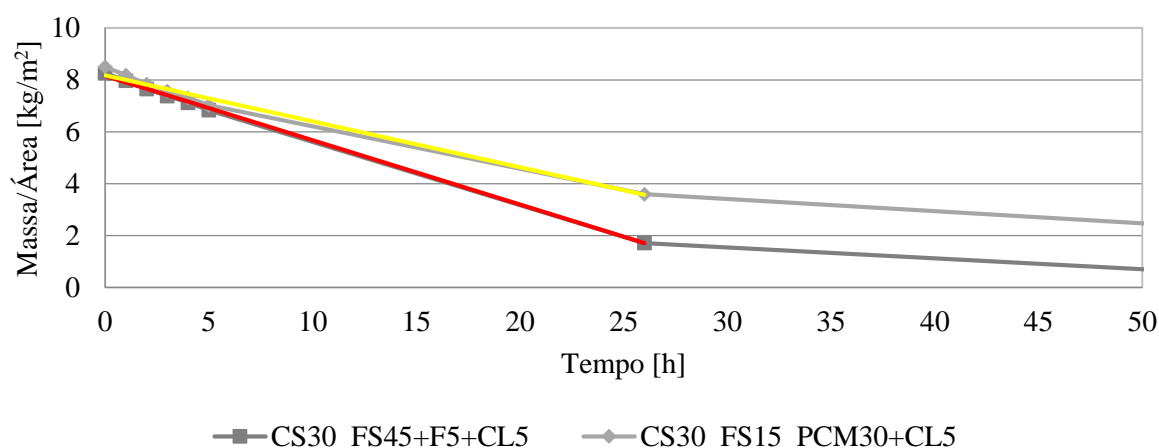


Figura 4.23 - Pormenor da curva de secagem

Os valores calculados para o índice de secagem e taxa de secagem são apresentados no Quadro 4.13. Um menor índice de secagem indica uma maior facilidade de secagem total enquanto uma maior taxa de secagem indica uma maior velocidade de secagem inicial. Assim, comparando as duas argamassas, é possível afirmar que a que contém fibras apresenta uma maior velocidade de secagem tanto globalmente como na fase inicial.

Quadro 4.13 - Índices de secagem e taxas de secagem

Argamassa	Índice de Secagem [-]	DP [-]	Taxa de Secagem [kg/(m ² .h)]	DP [kg/(m ² .h)]
CS30_FS45+F5+CL5	0,12	0,00	0,25	0,00
CS30_FS15_PCM30+CL5	0,22	0,02	0,18	0,01

4.4.3.7. Porosimetria de mercúrio

De forma a obter uma melhor caracterização dos poros das argamassas em estudo foi realizado o ensaio de porosimetria por intrusão de mercúrio. Este ensaio foi realizado aos provetes prismáticos a 90 dias de idade com recurso ao porosímetro "Autopore IV" da Micrometrics. O porosímetro usado contém duas portas de baixa pressão e uma porta de alta pressão, às quais está associado um *software* de cálculo que regista os valores obtidos.

A porosimetria de mercúrio consiste na introdução de mercúrio na amostra através de uma pressão aplicada. Assim, o volume total de poros consiste no volume de mercúrio necessário para encher todos os poros acessíveis.

De modo a garantir a segurança em termos de manuseamento do mercúrio, o ensaio é realizado no Laboratório de Análise de Microestrutura no DEC/FCT-UNL, condicionado sempre a uma temperatura inferior a 23°C. As amostras utilizadas foram as recolhidas do ensaio de resistência à compressão.

Inicialmente as amostras recolhidas foram desgastadas de modo a terem as dimensões necessárias para serem inseridas no penetrómetro com 5 cm³ de volume e colocadas em estufa ventilada, a 40°C durante pelo menos 24 h de forma a atingirem uma massa constante. Em seguida, as amostras são retiradas da estufa e colocadas num exsiccador durante aproximadamente 30 minutos, para arrefecerem até à temperatura ambiente. Após esse período as amostras são pesadas e colocadas no penetrómetro de sólidos, envolvendo o bordo com massa de selagem. Colocou-se a tampa no penetrómetro, lubrificando a haste, e pesou-se o conjunto numa balança de precisão 0,001 g.

O ensaio inicia-se com a introdução no programa de cálculo do aparelho (Autopore 9500) das massas determinadas, fundamentais para que seja calculado o volume de mercúrio introduzido em cada patamar. Numa primeira fase é analisada a porosimetria a baixa pressão. Nesta fase começa-se por condicionar a amostra a uma pressão de 100 µmHg durante 5 minutos de modo a estabilizar. É então introduzido o

mercúrio até que se atinja um total preenchimento da zona envolvente do provete e inicia-se o processo de intrusão, subindo a pressão em 15 patamares pré-definidos entre os valores de 0,0138 MPa e 0,2068 MPa.

Concluída a análise da porosimetria a baixa pressão retirou-se a amostra do penetrómetro e pesou-se, novamente, a massa do conjunto. Em seguida dá-se início à fase de alta pressão, colocando o penetrómetro na porta específica. O processo de incremento de pressão engloba 67 patamares, variando entre os valores 0,2758 MPa e 206,8427 MPa. A extrusão da pressão é realizada com recurso a 27 patamares, variando os valores entre 206,8427 MPa e 0,1034 MPa.

Em cada patamar de pressão, foi determinado um tempo de espera de 15 segundos na análise de baixa pressão e de 30 segundos na análise de alta pressão (Rato, 2006).

Durante o todo o procedimento o *software* de cálculo regista o volume de mercúrio introduzido. Com esses registos, o mesmo *software*, efetua os cálculos necessários relativos à intrusão incremental e cumulativa de mercúrio e as determinações de características da amostra como a porosidade aberta, a massa volúmica e o diâmetro de poros.

Resultados

Através do ensaio de determinação da porosimetria por intrusão de mercúrio foi possível ficar a conhecer melhor a microestrutura das argamassas analisadas. A Figura 4.24 apresenta a curva de distribuição dos poros das argamassas analisadas.

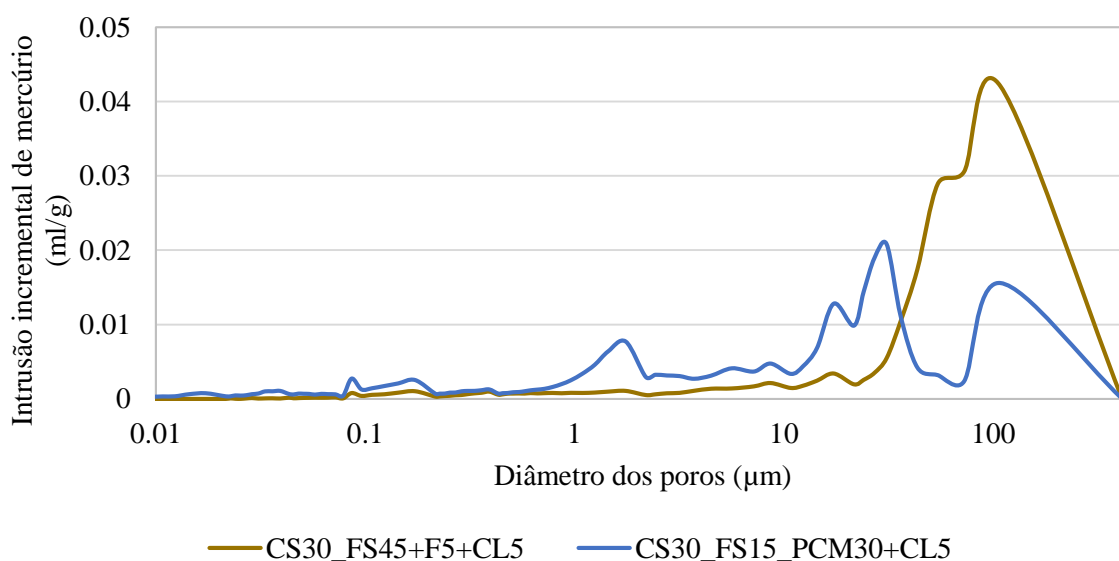


Figura 4.24 - Porosimetria por intrusão de mercúrio

Pela observação da Figura 4.24 é possível concluir que a argamassa com fibras a cal aérea (CS30_FS45+F5+CL5) contém maiores quantidades de poros com dimensões a rondar os 100 μm . A outra argamassa analisada, com PCM e cal aérea, apresenta três zonas distintas quanto ao diâmetro dos poros: a cerca de 5 μm , 60 μm e 110 μm . Esta situação pode ser a realmente existente para a argamassa. Contudo, é possível que existam poros de maiores dimensões que apenas são acessíveis pelos poros mais pequenos.

Além da curva de distribuição de poros foi também obtida a porosidade aberta por intrusão de mercúrio. Os resultados obtidos encontram-se no Quadro 4.14, verificando-se uma porosidade aberta ligeiramente maior para a argamassa com PCM.

Quadro 4.14 - Porosidade aberta por intrusão de mercúrio

Argamassa	Pab (%)
CS30_FS45+F5+CL5	35,7
CS30_FS15_PCM30+CL5	36,2

4.4.3.8. Medição de pH

Para medição do pH das argamassas em estudo foi utilizado o procedimento descrito em 4.3.3.

Resultados

Os resultados obtidos na medição do pH das argamassas CS30_FS45+F5+CL5 e CS30_FS15_PCM30+CL5 são apresentados no Quadro 4.15.

Quadro 4.15 - Valores de pH obtidos para as argamassas em estudo

Argamassa	pH
CS30_FS45+F5+CL5	9,44
CS30_FS15_PCM30+CL5	9,56

Comparando, então, as duas argamassas em estudo destaca-se o facto da argamassa com presença de PCM apresentar um pH mais elevado do que a argamassa que contém fibras. Este resultado é em parte surpreendente pois, se por um lado se esperava que os valores estivessem mais próximos do limite a partir do qual estão sujeitos a um menor risco de contaminação devido à presença de cal, por outro não era de todo expectável que, contrariamente ao ocorrido na primeira fase de ensaios, a argamassa com PCM apresentasse um valor superior ao da argamassa que contém fibras.

4.4.3.9. Ensaio de rugosidade

O ensaio de medição de rugosidade foi realizado segundo o procedimento descrito em 4.3.2.

Resultados

Os resultados obtidos para a altura média da superfície, S_a estão apresentados na Figura 4.25 juntamente com os obtidos na fase 1 de ensaios.

Tendo em conta os resultados descritos no ponto anterior para as mesmas argamassas mas sem a adição da cal aérea é possível verificar que os resultados obtidos são bastante diferentes. Se, no caso da argamassa CS30_FS45+F5+CL5, os valores registados para a rugosidade diminufram, no caso da argamassa CS30_FS15_PCM30+CL5 esses mesmos valores registaram um aumento.

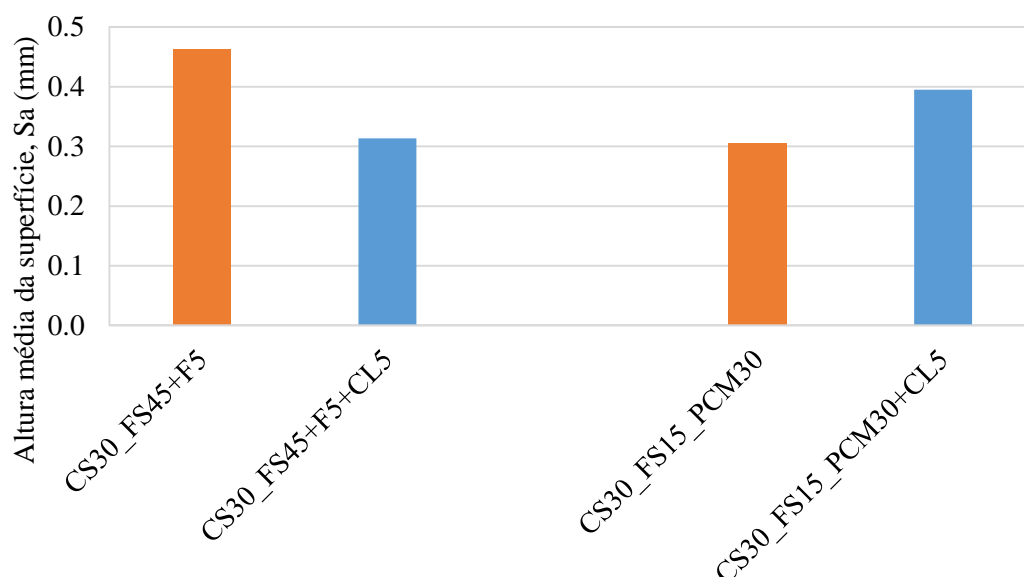


Figura 4.25 - Altura média da superfície

Na Figura 4.26 estão os resultados relativos à altura máxima da superfície, S_z obtidos através do ensaio de medição de rugosidade para as argamassas da fase 2 de ensaios e as argamassas de origem da fase 1 de ensaios.

Ao analisar a figura é notória a quebra acentuada do valor para o caso da argamassa com fibras. Para a argamassa com presença de PCM ocorreu um ligeiro aumento da altura máxima da superfície.

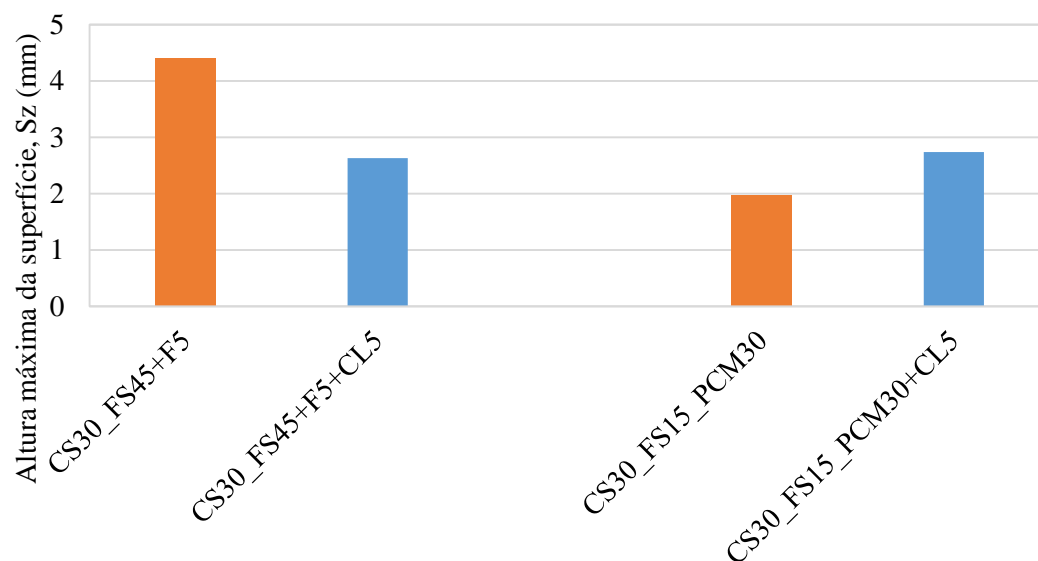


Figura 4.26 - Altura máxima da superfície

Para além dos valores apresentados é possível obter imagens em duas e três dimensões das superfícies dos provetes ensaiados. As Figura 4.27 e Figura 4.28 mostram a superfície de um provete da argamassa CS30_FS45+F5+CL5, obtida em duas e três dimensões.

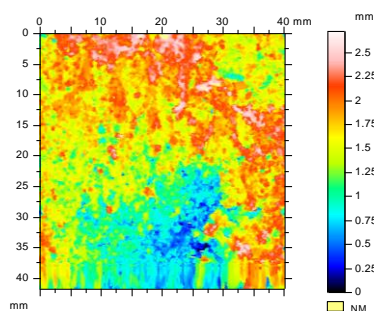


Figura 4.27 - Superfície de um provete da argamassa CS30_FS45+F5+CL5 em 2D

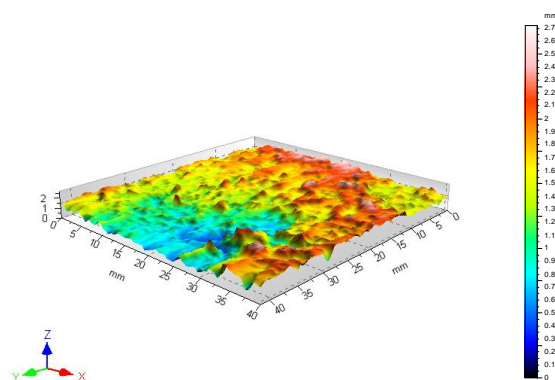


Figura 4.28 - Superfície de um provete da argamassa CS30_FS45+F5+CL5 em 3D

As Figura 4.29 e Figura 4.30 mostram a superfície de um provete da argamassa CS30_FS15_PCM30+CL5, obtida em duas e três dimensões.

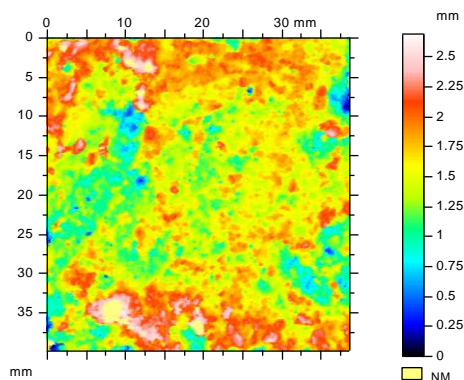


Figura 4.29 - Superfície de um provete da argamassa CS30_FS15_PCM30+CL5 em 2D

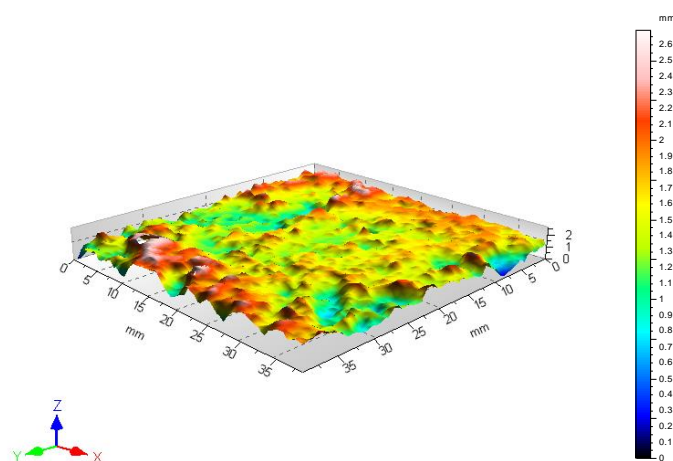


Figura 4.30 - Superfície de um provete da argamassa CS30_FS15_PCM30+CL5 em 3D

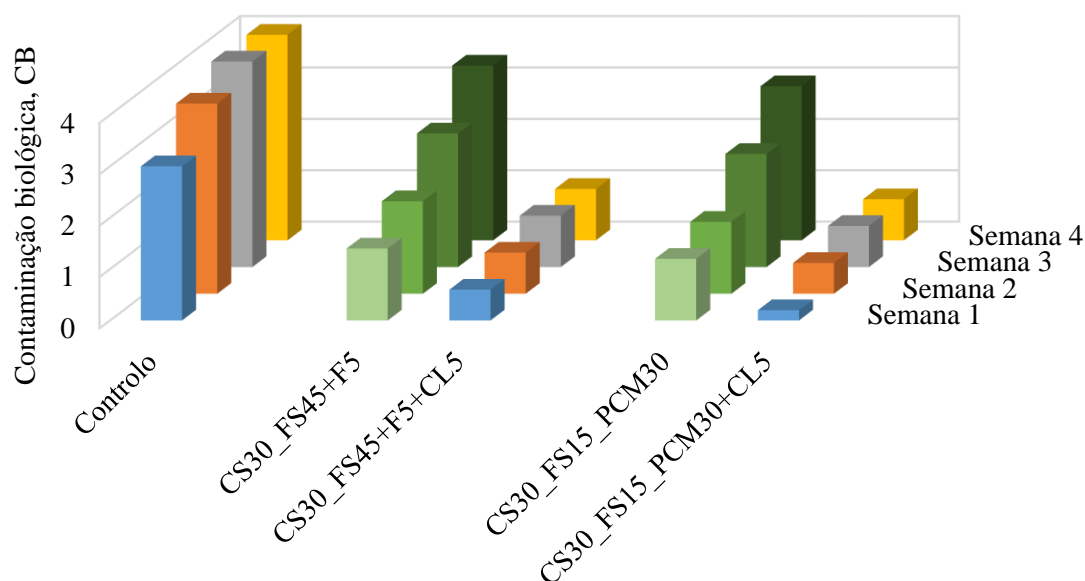
4.4.3.10. Ensaio de contaminação biológica

O procedimento utilizado na realização dos ensaios de contaminação biológica encontra-se descrito em 4.3.4.

Resultados

Na Figura 4.31 são apresentados os resultados obtidos para as argamassas em estudo na fase 2 de ensaios e as argamassas de origem da fase 1 de ensaio. A escala utilizada é: 0=sem crescimento; 1=menos de 10% da superfície de provete; 2=10 a 30%; 3=30 a 60%; 4≥60%. Tal como ocorrido na fase 1 de ensaios, os

ensaios de controlo realizados de modo a conferir se a proliferação dos fungos ocorreu de forma adequada obtiveram os resultados esperados, ou seja, atingiram o valor máximo da escala.



Nota: 0=sem crescimento; 1=menos de 10% da superfície de provete; 2=10 a 30%; 3=30 a 60%; 4≥60%.

Figura 4.31 - Resultados do ensaio de contaminação biológica

Na segunda fase de ensaios, independentemente de a argamassa ter na sua constituição fibras ou PCM, é importante destacar o efeito da cal. E neste aspeto, além de ter sido obtida uma diminuição clara da biosuscetibilidade, observa-se que o controlo do fungo em causa foi significativo.

Na Figura 4.32 são apresentados exemplos dos provetes após o ensaio de contaminação biológica. É possível observar que, contrariamente ao ocorrido na fase 1 de ensaios, a superfície do provete apresenta sinais de contaminação bastante reduzidos. Contudo, é importante salientar o facto de as figuras mostrarem apenas algumas zonas do provete, não sendo por isso possível generalizar sem a observação da totalidade do provete.

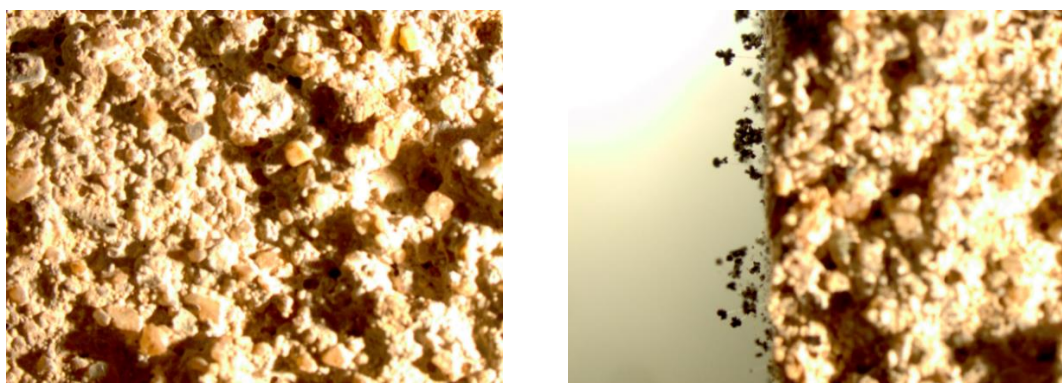


Figura 4.32 - Exemplos de contaminação biológica na argamassa CS30_FS15_PCM30+CL5

A argamassa CS30_FS45+F5 apresentava resultados médios superiores a 3 e a argamassa CS30_FS15_PCM30 resultados médios próximos de 3. Com a adição de 5% de cal aérea a suscetibilidade das argamassas à degradação parece ter sido reduzida de forma significativa. No caso da argamassa com fibras os resultados foram reduzidos para 1 sendo que todos os provetes obtiveram o mesmo resultado. No caso da argamassa com PCM os resultados baixaram para um valor médio de 0,8, ou seja, obtiveram os melhores resultados de todos os ensaios.

Contudo, apesar de em condições de humidade elevada permanente o efeito da cal poder ser apenas transitório, é importante destacar o efeito otimizador que teve sobre estas argamassas do ponto de vista da suscetibilidade à contaminação biológica.

5. Discussão de Resultados

5.1. Fase preliminar

Tendo em conta as condições de ensaio utilizadas e as limitações do ensaio de contaminação biológica, é possível constatar que o desenvolvimento do bolor *Aspergillus niger* na superfície das argamassas de cal aérea com alguma terra é relativamente limitado, embora a adição de fibras naturais possa levar a um incremento dos níveis de contaminação.

Um dos motivos que levaram ao desenvolvimento limitado do fungo pode ser o valor de pH que se admite que os provetes têm. É expectável, pelo estudo apresentado em 3.1.2, que uma argamassa de cal aérea tenha pH de 12,5 antes de ocorrida carbonatação e valores próximos de 9 após carbonatação, enquanto uma argamassa comercial de terra apresente um pH próximo de 8. Tal como referido anteriormente, para que ocorra contaminação é essencial, entre outros fatores, que o pH do provete se encontre abaixo de 9. Assim, devido ao elevado pH apresentado pela cal aérea, o desenvolvimento do bolor pode ter sido, favoravelmente, inibido.

Santos (2014a), ao estudar estas mesmas argamassas, obteve alguns resultados que podem ser relacionados com os obtidos na presente dissertação e já apresentados anteriormente. Assim, nas Figura 5.1 e Figura 5.2 estão sintetizados alguns desses resultados.

As resistências à tração por flexão e à compressão das argamassas (Figura 5.1) apresentam um comportamento similar.

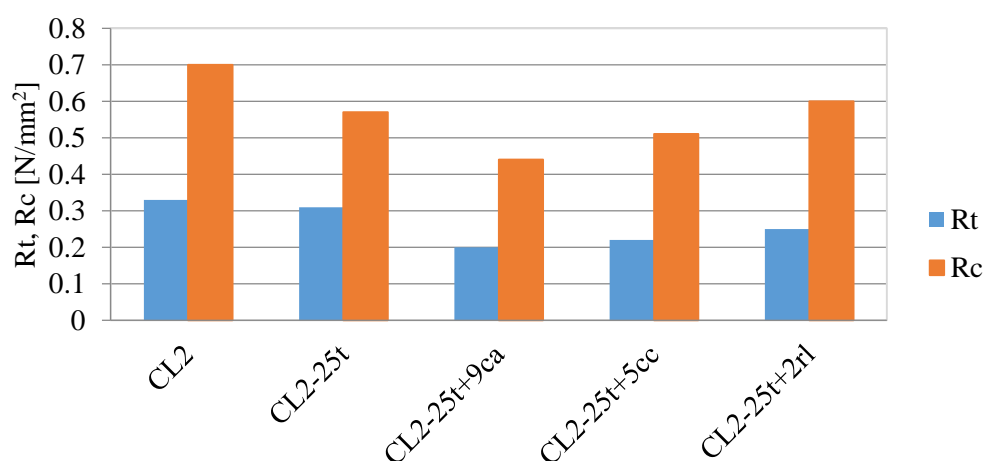


Figura 5.1 - Resistência à tração por flexão e à compressão das argamassas (Santos, 2014a)

A substituição de 25% de massa de cal por terra na argamassa diminui, como seria expectável, ambas as resistências, sendo a diminuição mais notória no caso da resistência à compressão. Em relação às argamassas com adição de fibras, é possível observar que apenas o resíduo de lã melhora a resistência à compressão quando comparado com a argamassa de cal e terra sem fibras. Nas restantes duas argamassas ocorre uma diminuição das resistências à tração por flexão e à compressão, sendo que a argamassa com pior desempenho é a com adição de casca de arroz. No entanto, recorda-se que a quantidade de qualquer dos tipos de fibras adicionadas foi muito elevada, reduzindo a quantidade de pasta de ligante presente.

A Figura 5.2 apresenta a massa volúmica e a porosidade aberta das argamassas. Ao observar a figura é facilmente perceptível que as argamassas apresentam tendências inversas face a estas duas características. Consta-se que apenas as argamassas com inclusão de casca de arroz e crina de cavalo apresentam variações acentuadas no que diz respeito à massa volúmica. Para as restantes argamassas, a massa volúmica mantém-se aproximadamente constante. Relativamente à porosidade aberta, quando comparada com os valores da argamassa de referência ocorre um aumento em todas as argamassas. Este é mais acentuado na presença de fibras, nomeadamente na presença de crina de cavalo e, particularmente, de casca de arroz.

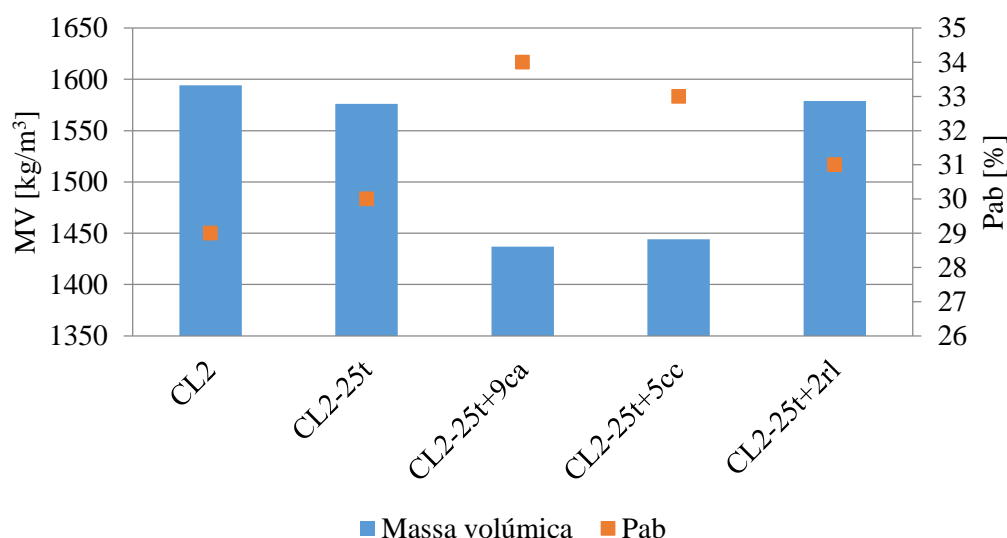


Figura 5.2 - Massa volúmica e porosidade aberta das argamassas (adaptado de Santos, 2014a)

Relacionando estes resultados com os obtidos nos ensaios de contaminação biológica nota-se que as argamassas que registaram maior presença de fungos são também as que apresentam valores mais elevados de porosidade aberta. Contrariamente ao referido em alguns estudos (Shirakawa, *et. al.*, 2003 e Tran, *et. al.*, 2013) a porosidade parece influenciar a disposição das argamassas à contaminação por bolores. É possível também observar na Figura 5.2 a relação existente entre a porosidade aberta e massa volúmica com as resistências à tração por flexão e compressão.

O grande objetivo desta fase, que passava pela validação do procedimento de ensaio, foi atingido, pelo que se passou a utilizar nas fases seguintes.

5.2. Fase 1 de ensaios

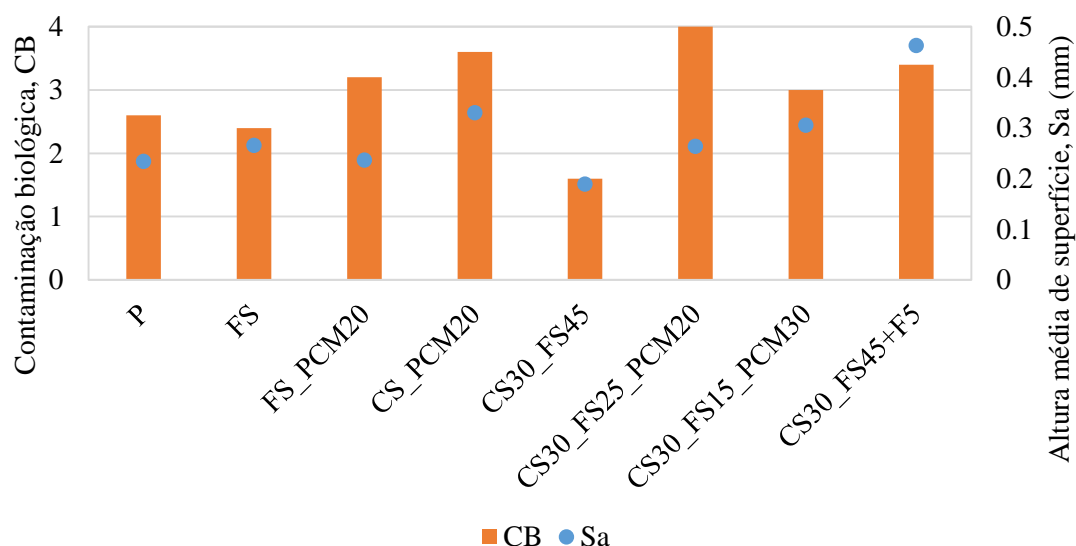
Tendo em conta as condições de ensaio utilizadas é possível constatar que o desenvolvimento do bolor *Aspergillus niger* na superfície das argamassas é elevado, sendo esse desenvolvimento incrementado com a adição de fibras naturais e PCM.

Admite-se que a adição de fibras naturais nas argamassas aumenta o risco de contaminação biológica por aumentar a quantidade de nutrientes disponíveis para os agentes de degradação. Como tal, era expetável que as argamassas com presença de fibras naturais na sua composição apresentassem níveis de degradação superiores aos das argamassas sem essa adição. Relativamente à argamassa pré-doseada (P), uma vez que contém fibras na sua constituição, admitia-se um resultado semelhante, no entanto e apesar do valor que apresenta não poder ser considerado baixo, comparativamente com a argamassa CS30_FS45_F5 apresenta melhores resultados.

No caso dos materiais de mudança de fase (PCM) os resultados foram, na maioria, piores que os obtidos na argamassa com fibras naturais. Se por um lado, por se tratar de um produto químico elaborado em laboratório, se esperava que tivessem uma maior resistência ao ataque biológico, por outro é importante destacar o baixo pH que, segunda a ficha técnica do material, estas partículas apresentam, variando entre 7,5 e 8,5. Este facto pode ser um dos motivos que leva as argamassas, nas quais foram introduzidos PCM, a apresentarem maior risco de contaminação. As argamassas com areia fina, grossa e PCM apresentam resultados curiosos. Apesar do aumento da suscetibilidade com a presença de PCM, um acréscimo na quantidade introduzida deste material não têm um efeito tão prejudicial. É, então, importante estudar em pormenor a presença de materiais de mudança de fase uma vez que nas proporções corretas podem não afetar em excesso a predisposição ao crescimento biológico de uma argamassa. Isto se, em termos de conforto térmico interior, se viesse a verificar ser vantajoso (o que não está no âmbito desta dissertação). Com base nos resultados obtidos por Santos (2014b), pelo menos parecem ocorrer variações nalgumas características das argamassas com PCM que podem ser prejudiciais à sua aplicação em rebocos.

Existem, pelo menos, três fatores importantes que podem explicar este elevado desenvolvimento biológico: a rugosidade, o pH e a porosidade.

No que diz respeito à rugosidade foi possível observar que, na maioria dos casos, as argamassas com maior rugosidade apresentaram também uma maior suscetibilidade à contaminação biológica. Na Figura 5.3 são apresentados os resultados conjuntos de altura média de superfície e contaminação biológica. Os valores de contaminação biológica são os obtidos ao fim das quatro semanas de ensaio. A escala utilizada é: 0=sem crescimento; 1=menos de 10% da superfície de provete; 2=10 a 30%; 3=30 a 60%; 4≥60%.



Nota: 0=sem crescimento; 1=menos de 10% da superfície de provete; 2=10 a 30%; 3=30 a 60%; 4≥60%.

Figura 5.3 - Comparação entre os resultados do ensaio de contaminação biológica e Sa

A argamassa CS30_FS45 é a que apresenta menores valores de altura média de superfície e, ao mesmo tempo, menor risco de contaminação biológica. Por sua vez, a argamassa FS_PCM20 que tem menor rugosidade quando comparada com a CS_PCM20 também apresenta melhores resultados no que respeita à contaminação por fungos. Outro exemplo da influência da rugosidade é a argamassa CS30_FS45+F5. Além de ser a argamassa que apresenta maiores valores de Sa é também uma das que apresenta maior biosuscetibilidade.

A argamassa P, tal como referido, apresenta menor risco de contaminação quando comparada com a argamassa formulada em laboratório com presença de fibras naturais. Independentemente da quantidade de fibras utilizadas e da formulação utilizada na sua elaboração é notória a menor rugosidade apresentada, conduzindo por isso a melhores resultados.

Os resultados apresentados vão de encontro ao perspectivado uma vez que, tal como referido em 3.1, a rugosidade é um fator muito importante na biodegradação dos materiais. A uma maior rugosidade corresponde geralmente uma maior contaminação biológica. Isto acontece devido a uma maior facilidade de aderência por parte do contaminante (Tran *et al.*, 2013) e por eventual facilidade de acumulação de nutrientes e água.

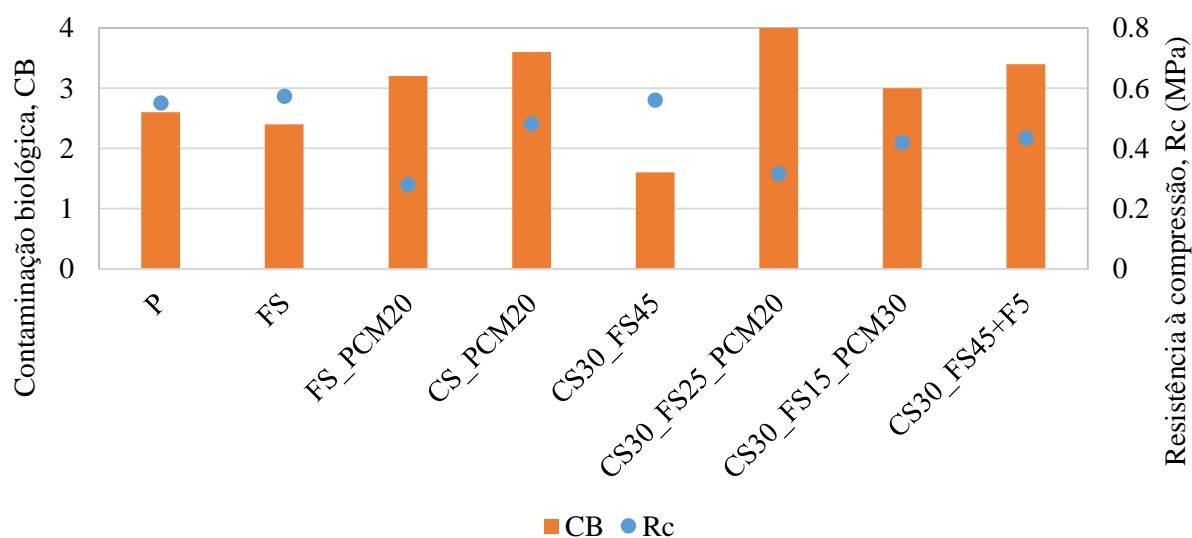
Contudo, apesar de os ensaios realizados demonstrarem a importância da rugosidade de uma superfície, a realização de diferentes acabamentos e, consequentemente, a análise de diferentes rugosidades numa argamassa com a mesma composição poderá levar a resultados mais exatos.

O outro fator importante referido é o pH da argamassa. Como referido em 3.1, Shirakawa *et al.* (2003) menciona que valores inferiores ou próximos de 9 permitem a colonização enquanto valores superiores ou

perto de 10 inibem o crescimento biológico. Assim, foi definido um limite de 9,5 acima do qual a colonização é inibida e abaixo do qual esta é propiciada.

Os resultados do ensaio de medição de pH realizados às argamassas na fase 1 de ensaios são todos semelhantes e inferiores a 9. Deste modo, é possível afirmar que todas as argamassas ensaiadas têm um pH que encoraja o desenvolvimento biológico. Apesar disso, não é possível identificar diferenças significativas entre argamassas, o que faz com que os resultados de pH não sejam cruciais para a ocorrência de maior ou menor contaminação biológica, uma vez que terá o mesmo impacto em todas as argamassas ensaiadas.

Além da rugosidade e do pH, foi possível encontrar um padrão relacionando a resistência à compressão (Santos, 2014b) com o nível de contaminação biológico atingido. Na Figura 5.4 é possível observar que as argamassas que apresentam uma maior resistência à compressão (P, FS e CS30_FS45) são também as que apresentam menores níveis de contaminação. Inversamente, as argamassas FS_PCM20 e CS30_FS25_PCM20 são as que apresentam maior suscetibilidade à contaminação biológica e menor resistência à compressão. A escala utilizada é: 0=sem crescimento; 1=menos de 10% da superfície de provete; 2=10 a 30%; 3=30 a 60%; 4≥60%.

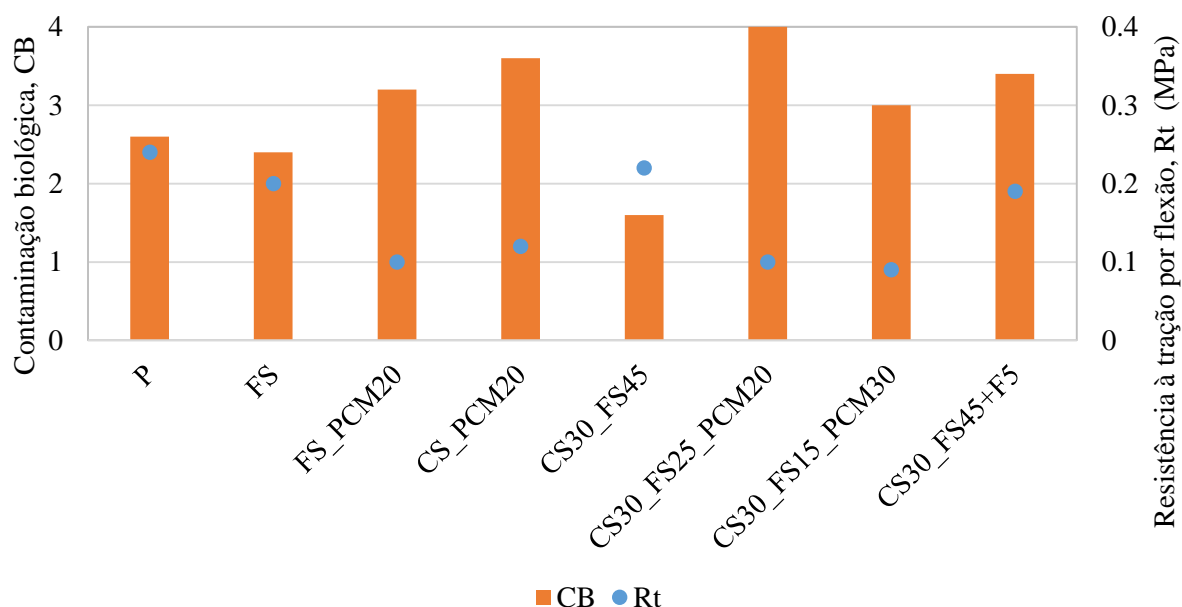


Nota: 0=sem crescimento; 1=menos de 10% da superfície de provete; 2=10 a 30%; 3=30 a 60%; 4≥60%.

Figura 5.4 - Comparação entre os resultados do ensaio de contaminação biológica e resistência à compressão

O mesmo se verifica para a resistência à tração por flexão. Uma maior resistência à tração conduz a um menor risco de contaminação biológica (Figura 5.5).

Estas relações podem ser explicadas através da porosidade. Uma maior porosidade pode diminuir a resistência da argamassa, bem como aumentar a sua permeabilidade, resultando numa maior disponibilidade para a colonização de microrganismos (Giannantonio *et. al.*, 2009).



Nota: 0=sem crescimento; 1=menos de 10% da superfície de provete; 2=10 a 30%; 3=30 a 60%; 4≥60%.

Figura 5.5 - Comparação entre os resultados do ensaio de contaminação biológica e resistência à tração por flexão

Na fase 1 de ensaios foi possível comprovar o descrito em 3.1, isto é, foi mostrado que a rugosidade afeta o risco de contaminação de uma argamassa. Foi também possível verificar que as resistências mecânicas também influenciam a suscetibilidade da argamassa uma vez que são diretamente influenciadas pela sua porosidade.

5.3. Fase 2 de ensaios

A fase 2 de ensaios teve como objetivo estudar o efeito da adição de cal às argamassas de terra analisadas na fase 1 de ensaios. A decisão de analisar este novo tipo de argamassas teve por base os resultados obtidos tanto na fase 1, como na fase preliminar. Os resultados obtidos na fase preliminar mostram que a cal tem um efeito inibidor no que diz respeito ao crescimento biológico. Por outro lado, uma argamassa só de terra não pode ser aplicada no exterior, onde tenha contacto com água da chuva. Tradicionalmente, em Portugal, era frequente a utilização de argamassas de terra estabilizadas com cal aérea. Por isso, optou-se por adicionar cal à argamassa com fibras e à com PCM que apresentaram um maior risco de contaminação.

De modo a conhecer melhor as características mecânicas das duas argamassas ensaiadas nesta fase, foram realizados paralelamente vários ensaios de caracterização que obtiveram os resultados já apresentados.

Uma vez que as argamassas de terra com adição de cal não estão muito estudadas, optou-se por comparar os resultados obtidos com o sugerido por normas e autores referentes a argamassas de terra e outros referentes a argamassas de cal aérea ou similares. Esta comparação é fundamental para perceber se as argamassas criadas são viáveis do ponto de vista de suscetibilidade à contaminação biológica mas também em termos de características físicas e mecânicas genéricas.

A norma DIN 18947 (NaBau, 2013) indica que uma argamassa de terra, no seu estado fresco, deve ter uma consistência por espalhamento de 175 ± 5 mm. As argamassas formuladas cumprem este requisito uma vez que apenas se afastam 1 mm do valor sugerido (Quadro 4.7). A mesma norma define que uma argamassa, no estado fresco, deve apresentar uma massa volúmica superior a $1,2 \text{ kg/dm}^3$. Os valores de massa volúmica obtidos para ambas as argamassas estudadas cumprem o mínimo exigido pela norma (Quadro 4.8).

Comparando o valor de massa volúmica no estado fresco obtido para a argamassa com fibras e adição de cal aérea com o obtido por Santos (2014b) para uma argamassa similar mas sem a presença de cal nota-se que houve uma ligeira diminuição deste parâmetro (Figura 5.6). No que diz respeito à argamassa com PCM ocorreu o oposto. Neste caso com a adição da cal aérea houve um aumento da massa volúmica em cerca de 10%. Estas variações podem ser explicadas pela presença da cal. Ao adicionar cal à argamassa com fibras colocou-se um material mais leve do que a mistura existente e isso fez diminuir a massa. Todavia, no caso da argamassa com PCM, a cal deixa de ser o material mais leve. Como a cal tem maior baridade que o PCM, a massa aumentou.

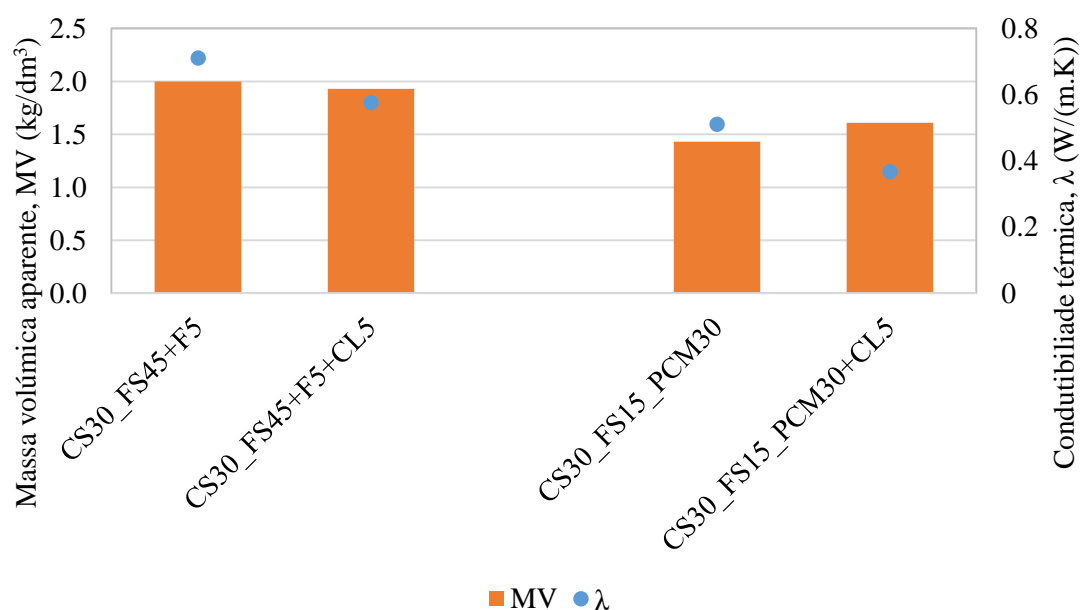


Figura 5.6 - Comparação entre os resultados de MV e λ obtidos na presente dissertação e em Santos (2014b)

Em relação à condutibilidade térmica, as argamassas não podem ser classificadas segundo o ITE50 uma vez que o provete a ser ensaiado não ocupava toda a área da sonda de medição. Contudo, neste documento é definido como coeficiente de condutibilidade térmica de argamassas de cal ou bastardas um valor de 0,80 W/m.K e um coeficiente de 1,3 W/m.K para argamassas e rebocos tradicionais. Observando os valores apresentados no Quadro 4.9 nota-se que estes são menores que os sugeridos no ITE50.

Relativamente ao efeito da adição de cal aérea pode-se observar que em ambos os casos houve um decréscimo da condutibilidade térmica, sendo que no caso da argamassa com fibras a diminuição foi de cerca de 25%, enquanto na argamassa com PCM a diminuição foi de aproximadamente 40%. Tal facto indica que, nas argamassas em estudo, a presença da cal melhorou a argamassa do ponto de vista térmico.

Segundo Röhlen e Ziegert (2011) as argamassas de terra apresentam um módulo de elasticidade dinâmico que se situa entre 450 e 3000 MPa. Por sua vez, para argamassas para edifícios antigos ou com resistência mecânicas similares, Veiga *et al.* (2010) define a gama ideal entre os 2000 e 5000 MPa.

O resultado obtido para a argamassa de terra com 5% de cal aérea e adição de fibras encontra-se dentro do intervalo definido pelo primeiro autor, embora abaixo da gama de valores sugerida pelo segundo autor.

No que diz respeito à argamassa de terra com 5% de cal aérea e adição de PCM verifica-se que, tal como no caso anterior, os requisitos propostos por Röhlen e Ziegert (2011) são cumpridos enquanto os sugeridos por Veiga *et al.* (2010) não são alcançados.

Não obstante, uma vez que a maior percentagem na argamassa é de terra (quando comparado com cal aérea) pode-se afirmar que as argamassas em questão cumprem os requisitos.

Para a resistência à compressão, Röhlen e Ziegert (2011) afirmam que os valores devem estar entre os 0,6 e 3 MPa para as argamassas de terra. Veiga *et al.* (2010) recomenda uma gama de valores de resistências mecânicas para argamassas para edifícios antigos: para rebocos interiores a resistência à tração por flexão deve estar compreendida entre 0,2 e 0,7 MPa, enquanto a resistência à compressão deve estar situada entre 0,4 e 2,5 MPa.

Analisando os valores obtidos verifica-se que para a resistência à compressão não são verificados os requisitos de ambos os autores. No caso da resistência à tração por flexão a argamassa que contém fibras está compreendida nos valores propostos por Veiga *et al.* (2010) enquanto a argamassa com substituição de areia fina por PCM não alcança o valor mínimo sugerido por muito pouco. Esta situação é bastante promissora para argamassas para rebocos uma vez que, embora a norma genérica de argamassas para rebocos, EN 998-1 (CEN, 2010) defina limites de resistência à compressão, é reconhecido que a resistência à flexão é muito mais importante face ao desempenho que as argamassas vão ter.

De modo a perceber o efeito que a cal tem do ponto de vista das resistências mecânicas, na Figura 5.7 são apresentados os resultados obtidos na presente dissertação e os obtidos por Santos (2014b) para argamassas similares mas sem presença de cal.

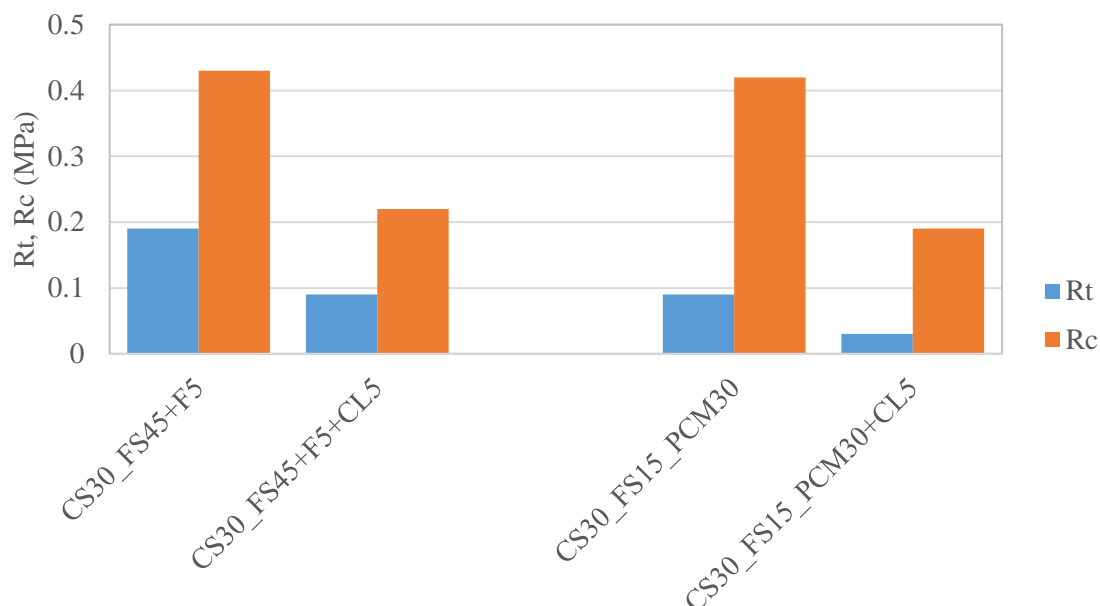


Figura 5.7 - Comparação entre os resultados de Rt e Rc obtidos na presente dissertação e em Santos (2014b)

Com a introdução de um ligante químico à terra argilosa poderia ser expectável que a resistência à tração por flexão e à compressão aumentasse. Contudo, como é visível na Figura 5.7, as duas argamassas apresentam uma diminuição de resistências para cerca de metade. Estes resultados foram também obtidos por outros autores como Gomes (2013). A autora verificou que a adição de ligantes químicos à terra, em argamassas com e sem fibras de cânhamo, diminuiu de uma forma geral os valores de resistência à tração por flexão.

Para Gomes (2013) estes resultados poderão dever-se às baixas percentagens de ligante adicionadas (até 15% da massa de terra) e a eventuais alterações introduzidas na pasta de terra, que não tenham tido correspondência ao nível de reações químicas ocorridas.

Dias (2013) e Jamú (2013) obtiveram melhores desempenhos a nível mecânico para argamassas com grandes percentagens de cal. Ao aumentar a percentagem de terra nas argamassas ocorreu um decréscimo ao nível de resistência à tração e à compressão. Assim sendo, nestes estudos, a percentagem de cal nunca foi inferior a 50%. Apesar disso, esta tendência deve ser melhor estudada aumentando progressivamente a percentagem de cal introduzida (acima de 15% e até 50%) procurando determinar a evolução.

Relativamente ao sucedido no caso da presente dissertação, considera-se que a introdução de baixa percentagem de cal aérea, embora constituindo um ligante mais “forte” comparativamente à argila da terra, altera completamente o funcionamento da argamassa. E muito provavelmente essa alteração sobrepõe-se à alteração de ligante, *per si*. Na verdade a argamassa torna-se como uma rocha carbonatada, enquanto sem a estabilização mantém uma grande deformabilidade e capacidade de interagir com o ambiente. É, no

entanto, essa capacidade de interagir com o ambiente, nomeadamente ao nível de humidade relativa, que não possibilita o uso só de terra em argamassas para aplicação no exterior.

Relativamente à absorção de água por capilaridade, os resultados obtidos para as duas argamassas elaboradas são comparados na Figura 5.8 com os obtidos por Santos (2014b).

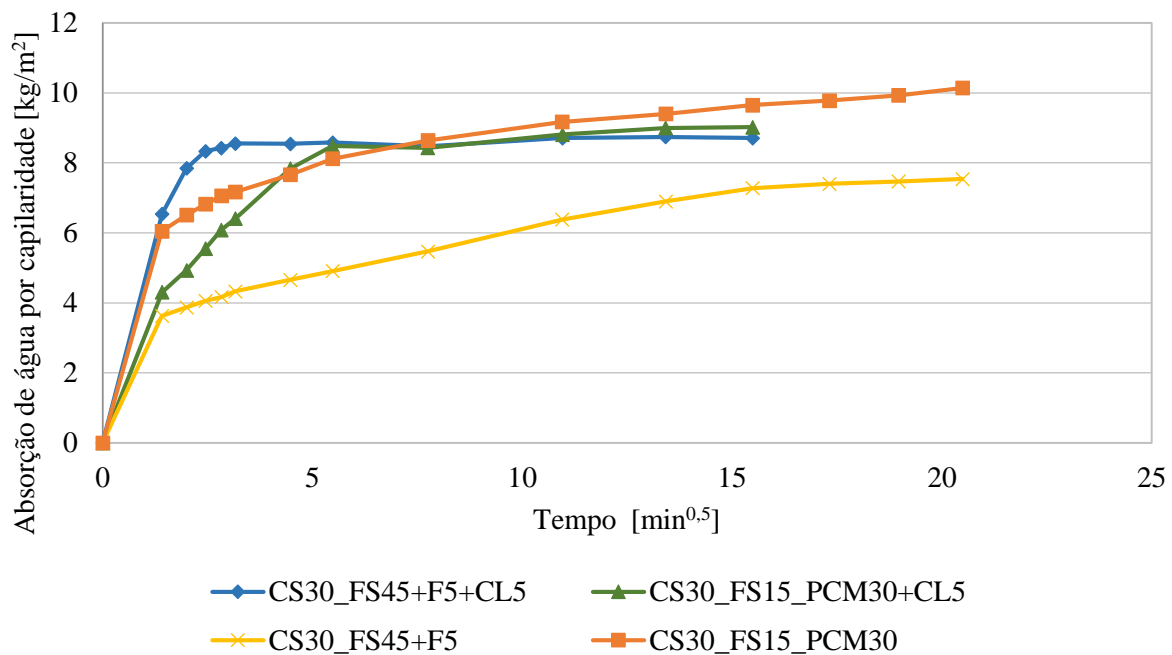


Figura 5.8 - Curvas de capilaridade obtidas na presente dissertação e em Santos (2014b)

A argamassa com fibras e cal aérea apresenta um maior coeficiente de capilaridade do que a mesma argamassa mas sem cal. Além de a absorção inicial ser maior, esta argamassa absorve uma maior quantidade total de água, atingindo um maior valor assintótico. Neste caso, podemos dizer que a presença da cal aérea aumenta a absorção de água.

Para a argamassa com PCM e cal ocorre o contrário, apesar das curvas serem próximas. Neste caso, a cal não teve o mesmo efeito que na argamassa anterior. É importante referir que a curva de capilaridade da argamassa CS30_FS15_PCM30+CL5 desenvolve-se de maneira diferente da esperada e que seria mais curvilínea na fase inicial.

Tal como na capilaridade, é importante perceber qual o efeito que a cal teve ao nível da secagem. Na Figura 5.9 são apresentadas as curvas de secagem das argamassas elaboradas na fase 2 de ensaios e os resultados obtidos por Santos (2014b) para argamassas similares mas sem adição de cal aérea. No entanto, há que referir que o nível de saturação de partida pode ter sido diferente, uma vez que no caso das argamassas de

Santos (2014b) sem cal, o ensaio de capilaridade teve de terminar e o de secagem de iniciar-se, sem saturação total dos provetes.

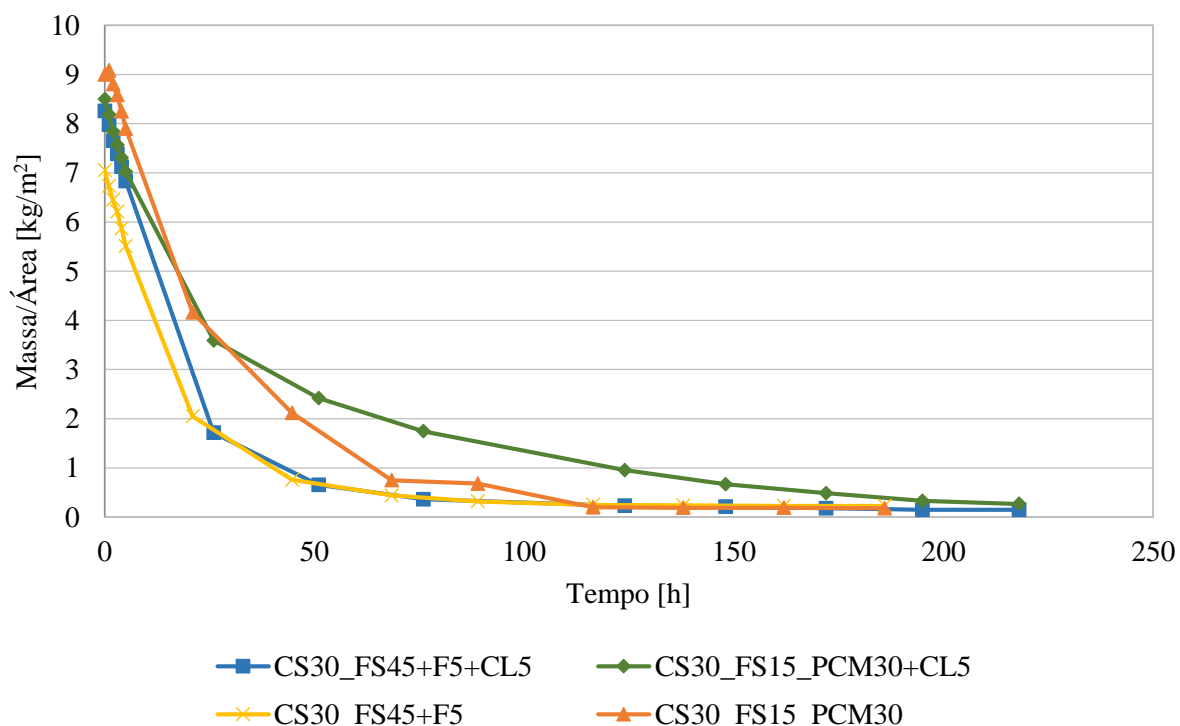


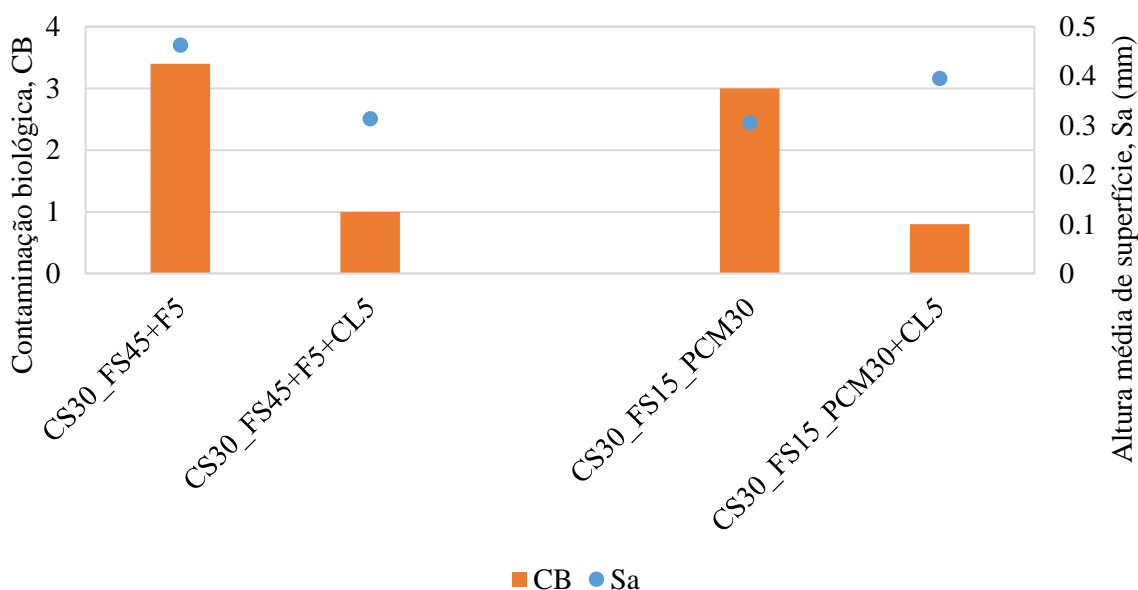
Figura 5.9 - Curvas de secagem obtidas na presente dissertação e em Santos (2014b)

Ao nível da secagem os dois pares de argamassas apresentam curvas de secagem bastante semelhantes. Apenas na argamassa com PCM é que após uma primeira fase idêntica, a argamassa sem cal parece atingir a secagem total mais rapidamente. Pode-se então afirmar que a adição de cal não afetou a secagem de maneira significativa, particularmente no caso das argamassas com fibras.

Tal como referido anteriormente, foram analisados dois fatores que podem ter tido influência no desempenho da argamassa face ao ataque por fungos. Esses fatores são a rugosidade e o pH.

No que diz respeito à rugosidade, como é possível observar pela Figura 5.10, não foi possível retirar ilações. A escala utilizada para expressar os níveis de contaminação biológica é: 0=sem crescimento; 1=menos de 10% da superfície de provete; 2=10 a 30%; 3=30 a 60%; 4≥60%.

Se por um lado, no caso da argamassa com fibras, ocorreu uma diminuição do nível de contaminação biológica e da rugosidade, por outro, no caso da argamassa com PCM, a adição da cal aérea fez aumentar a rugosidade e diminuir o nível de contaminação.



Nota: 0=sem crescimento; 1=menos de 10% da superfície de provete; 2=10 a 30%; 3=30 a 60%; 4≥60%.

Figura 5.10 - Comparação entre os resultados do ensaio de contaminação biológica e Sa

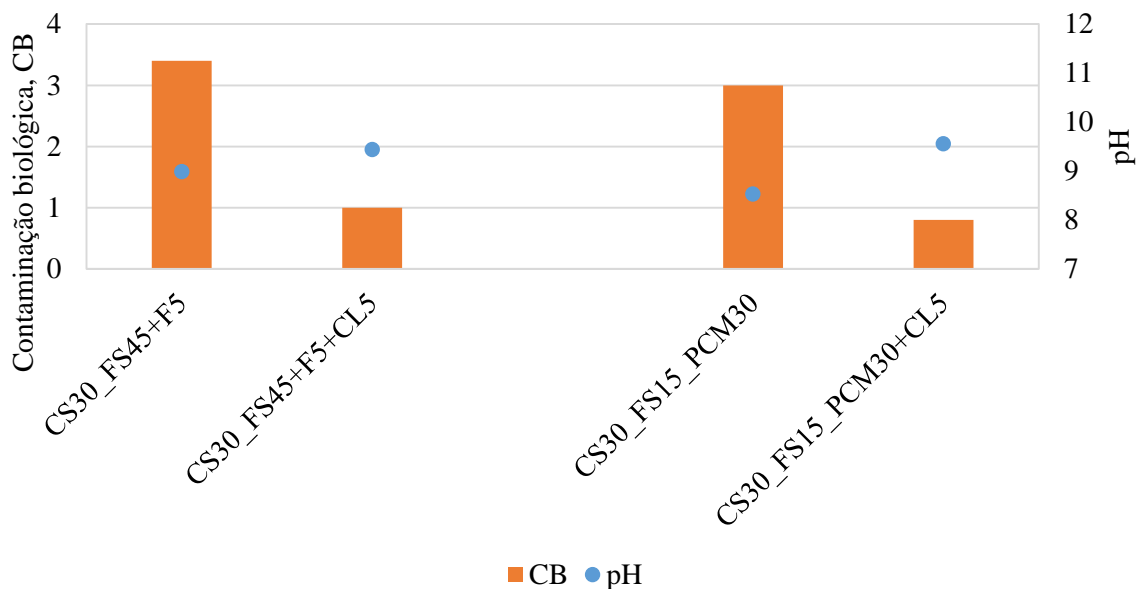
Seria de esperar que uma diminuição da rugosidade diminuísse o risco de contaminação e que, em caso de aumento da rugosidade, ocorresse o oposto. Contudo, a adição de um novo ligante com características diferentes das existentes inicialmente faz com que a rugosidade não tenha o mesmo papel. Este modo, para perceber melhor o efeito da rugosidade seria preciso criar uma nova argamassa com as mesmas percentagens de argila e cal mas com variações nas quantidades de areia fina e grossa de modo a alterar a altura média da superfície.

Uma vez que, ao contrário do verificado na primeira fase de ensaios, a rugosidade não tem influência na diminuição ocorrida nestes últimos ensaios é importante analisar a influência do pH.

A Figura 5.11 mostra os resultados de contaminação biológica obtidos ao fim de quatro semanas de ensaios e os valores de pH medidos. A escala utilizada para expressar os níveis de contaminação biológica é: 0=sem crescimento; 1=menos de 10% da superfície de provete; 2=10 a 30%; 3=30 a 60%; 4≥60%.

Como é possível observar, em ambos os casos, ocorreu um aumento do pH ao adicionar cal aérea à argamassa de referência. Este aumento é normal tendo em conta o maior valor de pH esperado para a cal quando comparado com o da argamassa sem cal e o da argila. De modo inverso, os níveis de contaminação biológica diminuíram com a adição de cal à argamassa existente inicialmente.

Como descrito em 3.1, o pH tem bastante influência na permissão ou inibição de crescimento de fungos. Assim, os melhores resultados apresentados pelas argamassas com cal devem-se, essencialmente, ao aumento de pH que ocorreu. Shirakawa *et al.* (2003) salienta que valores de pH próximos ou acima de 10 inibem a colonização. Nas argamassas estudadas na fase 2 de ensaios, os valores de pH aproximam-se de 10, justificando assim a menor contaminação ocorrida.

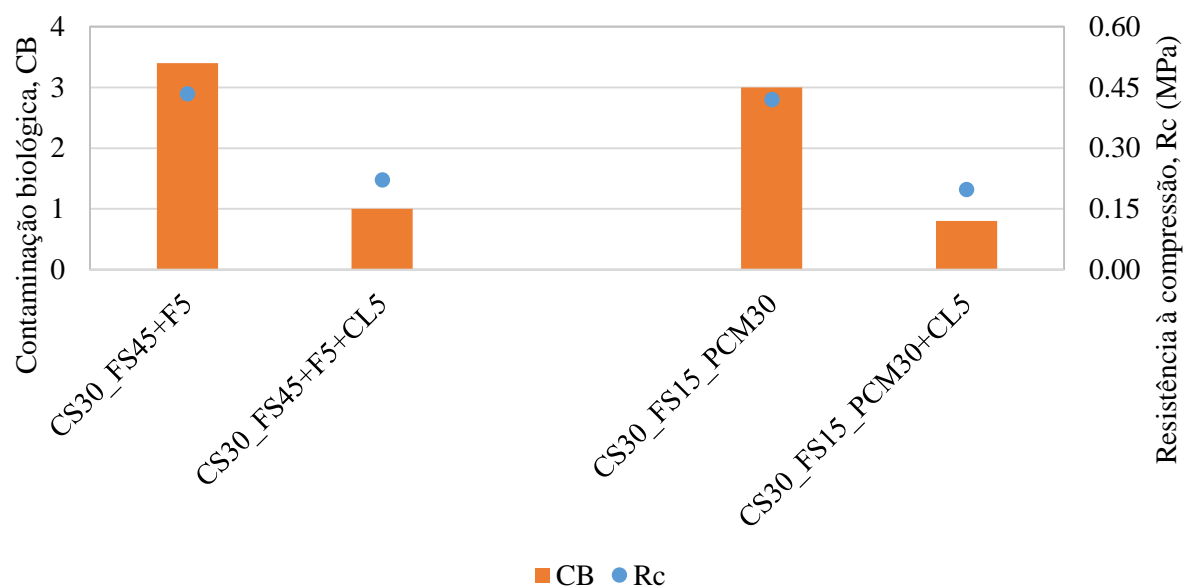


Nota: 0=sem crescimento; 1=menos de 10% da superfície de provete; 2=10 a 30%; 3=30 a 60%; 4≥60%.

Figura 5.11 - Comparação entre os resultados do ensaio de contaminação biológica e pH

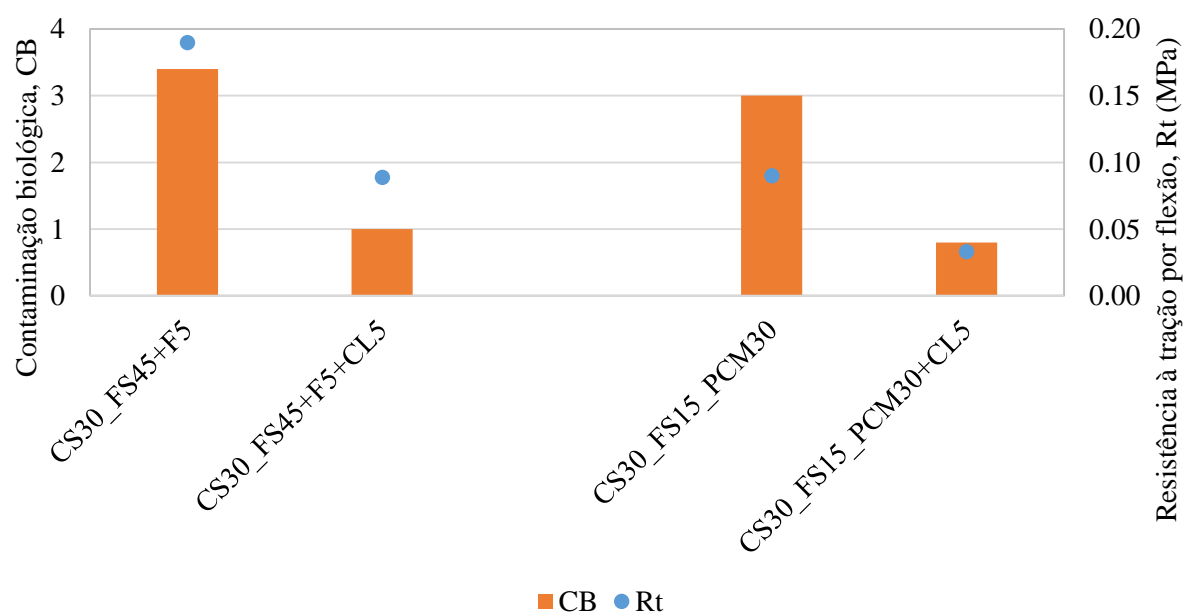
Uma vez que nas fases preliminar e 1 de ensaios foi encontrada uma relação entre as resistências mecânicas e o risco de contaminação biológico, achou-se interessante fazer a mesma comparação para as argamassas aqui estudadas e relacioná-las com as de Santos (2014b). A Figura 5.12 relaciona os resultados do ensaio de contaminação biológica com a resistência à compressão e a Figura 5.13 os resultados entre o ensaio de contaminação biológica e a resistência à tração por flexão. A escala utilizada para expressar os níveis de contaminação biológica é: 0=sem crescimento; 1=menos de 10% da superfície de provete; 2=10 a 30%; 3=30 a 60%; 4≥60%.

Como é possível observar, não se verificou o mesmo padrão das fases de ensaio anteriores. Estas argamassas apresentaram uma diminuição das resistências mecânicas que coincidiu também com um menor risco de colonização. Estes resultados são aceitáveis e não contrariam os obtidos anteriormente uma vez que a presença de cal aérea altera as características das argamassas e afeta o nível de contaminação atingido.



Nota: 0=sem crescimento; 1=menos de 10% da superfície de provete; 2=10 a 30%; 3=30 a 60%; 4≥60%.

Figura 5.12 - Comparação entre os resultados do ensaio de contaminação biológica e resistência à compressão



Nota: 0=sem crescimento; 1=menos de 10% da superfície de provete; 2=10 a 30%; 3=30 a 60%; 4≥60%.

Figura 5.13 - Comparação entre os resultados do ensaio de contaminação biológica e resistência à tração por flexão

Na fase 2 de ensaios foi possível avaliar a importância do pH de uma argamassa na inibição do crescimento de fungos e ainda perceber os efeitos que a adição de cal traz à argamassa de terra.

6. Conclusões

6.1. Considerações finais

Em Portugal, grande parte do património português de construções de terra precisa de ser reabilitado, uma vez que se tratam de construções bastante antigas. A sua intervenção passa por conhecer melhor as características dos materiais que as constituem e o processo construtivo pelo qual foram realizadas.

Apesar da crescente importância que tem sido dada a este tema a nível internacional, as argamassas de terra não possuem, ainda, uma completa caracterização e, por isso, não se conhece profundamente o seu comportamento. Contudo, este tipo de argamassas tem vindo a ser cada vez mais estudado, por se tratar de um material com diversas vantagens. Estes estudos são realizados a argamassas de terra ou com terra e cal, tentando obter o melhor de dois materiais. Com efeito, as argamassas só de terra podem ser aplicadas em rebocos interiores mas em rebocos exteriores, atingidos pela chuva, é necessária uma estabilização com cal.

Com a conclusão da campanha experimental e respetiva discussão dos resultados, pode-se concluir que os objetivos propostos inicialmente foram, de modo geral, atingidos. Estes passavam por conhecer melhor o comportamento de determinadas argamassas à contaminação biológica e quais as características que o influenciam. O estudo foi dividido em três fases sendo que inicialmente foi possível avaliar o método para aferir a suscetibilidade ao ataque por fungos de argamassas de cal aérea com introdução de terra argilosa e ainda fibras naturais. Numa fase seguinte foi realizado um estudo similar mas para argamassas de terra com diferentes tipos de adições e granulometria de agregados. Por último, às argamassas com maior risco de contaminação da fase anterior foram acrescentadas pequenas percentagens de cal aérea e foram analisadas as alterações que isso implica.

Ao nível dos ensaios preliminares, concluiu-se que no caso das argamassas que registaram maior presença de fungos foi possível identificar que eram também as que apresentavam valores mais elevados de porosidade aberta. Nas condições de ensaio, para estas argamassas, a porosidade parece influenciar a disposição à contaminação por bolores.

Na fase 1 de ensaios pretendeu-se analisar o risco de contaminação de argamassas de terra às quais foram adicionados PCM e fibras e perceber que outros fatores o podem influenciar. Estudou-se então a rugosidade e o pH dos materiais. Em relação ao pH apenas foi possível concluir que o baixo pH apresentado por todas as argamassas ensaiadas parece propiciar o desenvolvimento biológico. Apesar disso, devido ao pH ser muito semelhante em todas as argamassas não foi possível obter um padrão relacionável. Por sua vez, concluiu-se que a rugosidade tem uma importância muito elevada no nível de crescimento biológico para condições de pH semelhante. Foi demonstrado que as argamassas com maior rugosidade são também as que apresentam piores resultados ao nível dos ensaios de contaminação biológica.

Além destes dois fatores estudados na primeira fase de ensaios, foi possível comparar ainda o nível de contaminação com as resistências à tração por flexão e à compressão. Esta comparação permite compreender se a porosidade, tal como na fase preliminar, influenciou os resultados obtidos. Concluiu-se que as argamassas com menor resistências mecânicas e, por isso, maior porosidade, apresentam uma maior disponibilidade para a colonização de microrganismos.

Das argamassas estudadas verificou-se que as que continham PCM foram as que apresentaram piores resultados, sendo que variam consoante a percentagem de material introduzido. As argamassas com fibras tiveram, também, um desempenho bastante negativo.

Na segunda fase de ensaios, pretendeu-se perceber o efeito da adição de cal aérea, em pequena quantidade, a argamassas de terra. Assim, foram ensaiadas duas argamassas: com fibras ou com PCM. As argamassas ensaiadas na fase anterior tinham sido caracterizadas por outro autor e concluiu-se que cumpriam os requisitos necessários para serem utilizadas. Então, para perceber se estas novas argamassas também verificavam os requisitos necessários, foram realizados, paralelamente aos ensaios de contaminação biológica, ensaios de caracterização física e mecânica.

Foi demonstrado que as argamassas desenvolvidas cumprem os requisitos necessários para serem aplicadas, o que torna os resultados de contaminação biológica bastante interessantes. Foi também verificado que a adição de uma pequena percentagem de cal aérea às argamassas de terra existentes fez com que o desenvolvimento biológico fosse inibido.

Nesta fase de ensaios, foi também possível relacionar as três características mencionadas anteriormente: rugosidade, porosidade e pH.

No que diz respeito à rugosidade verificou-se que a introdução da cal fez variar de forma distinta as duas argamassas, o que não permite obter conclusões ao nível da contaminação biológica. Por sua vez, as resistências mecânicas diminuíram e isso pode ter contribuído para uma maior porosidade. Seria então de esperar que o crescimento de microrganismos aumentasse. Contudo, devido à introdução de um ligante como a cal aérea as características da argamassa mudaram e, por isso, não é possível comparar estes valores. Assim, é devido à alteração do pH que se verificaram os melhores resultados de contaminação. A adição de um material com um pH superior ao existente nas argamassas de terra fez com que esse valor aumentasse, passando a inibir o crescimento de fungos.

Em suma, provou-se que fatores como a rugosidade, pH e porosidade podem influenciar a suscetibilidade à contaminação biológica de uma argamassa, sendo que é necessário analisar o tipo de argamassas estudadas e qual dos fatores referidos terá maior importância em cada caso. Foi também comprovado que a adição de cal aérea com terra argilosa pode produzir argamassas interessantes e que devem ser no futuro amplamente estudadas.

Relativamente aos materiais de mudança de fase e às fibras naturais é importante realçar que ambos pioram as características das argamassas a nível de contaminação. Contudo, é também compreensível que continuem a ser estudados particularmente se se comprovar que podem melhorar outras características das argamassas. É então necessário realizar novas campanhas experimentais para perceber quais as proporções ideais de cada constituinte para obter argamassas melhoradas.

Espera-se que a presente dissertação promova as qualidades das argamassas com terra ensaiadas levando a que, no futuro, mais estudos sejam realizados para que ocorra uma maior consciencialização para a eco-eficiência dos materiais utilizados nos edifícios.

6.2. Propostas de desenvolvimentos futuros

Com o intuito de otimizar os resultados obtidos e estudar melhor as características analisadas na presente dissertação sugerem-se os seguintes trabalhos:

- Diversificar o tipo de argila das terras utilizadas, a fim de verificar se ocorrem diferenças significativas.
- Diversificar a percentagem de cal aérea introduzida nas argamassas de terra. Isto serviria para perceber quais os efeitos que essas variações teriam ao nível da contaminação biológica. Além disso, seriam ainda verificadas as características físicas e mecânicas das argamassas.
- Alterar as percentagens de areia grossa e fina nas argamassas de terra. Este estudo seria útil para perceber se é possível, apenas através da alteração das proporções de areias, melhorar uma argamassa do ponto de vista de risco de contaminação.
- Utilizar diferentes tipos de fibras e em diferentes quantidades. Ajudaria a uma melhor compreensão do efeito que as fibras têm, tanto a nível mecânico, como ao nível da suscetibilidade à contaminação biológica.
- Utilizar diferentes acabamentos em provetes da mesma argamassa. A variação do acabamento provocaria uma alteração da rugosidade da superfície. Este fator viu-se ser bastante importante e ajudaria a compreender melhor a sua relevância.

Bibliografia

Alexopoulos, C.; Mims, C.; Blackwell, M. (1996) – *Introductory Mycology*. 4th edition, New York: John Wiley & Sons.

Ariño, X.; Gomez-Bolea, A.; Saiz-Jimenez, C. (1997) – Lichens on ancient mortars. *International Biodeterioration & Biodegradation*, vol. 40, 217-224.

Arizzi, A.; Cultrone, G.; Viles, H. (2013) - Standardized and non-standardized tests to study the hygric behaviour of repair rendering mortars. HMC 2013 - 3rd Historic Mortars Conference, Glasgow, Scotland (CD).

ASTM, ASTM 5590-00 (2000) – Determining the resistance of paint films and related coating to fungal defacement by accelerated four-week agar plate assay. ASTM International, Pennsylvania, USA.

Brito, V.; Gonçalves, T. (2013) - Artisanal lime coatings and their influence on moisture transport during drying. HMC 2013 - 3rd Historic Mortars Conference, Glasgow, Scotland (CD).

CEN (1998a) – EN 1015-2:1998 – Methods of test for mortars for masonry – Part 2: Bulk sampling of mortars and preparation of the test mortars. Brussels.

CEN (1998b) – EN 1015-6:1998 – Methods of test for mortar for masonry - Part 6: Determination of bulk density of fresh mortar. Brussels.

CEN (1999a) – EN 1015-3:1999 – Methods of test for mortar for masonry. Determination of consistence of fresh mortar (by flow table). Brussels.

CEN (1999b) – EN 1015-11:1999 – Methods of test for mortar for masonry – Part 11: Determination of flexural and compressive strength of hardened mortar. Brussels.

CEN (2002) – EN 1015-18:2002 – Methods of test for mortars for masonry - Part 18: Determination of water absorption coefficient due to capillary action of hardened mortar. Brussels.

CEN (2009) – EN 15801 – Conservation of cultural property. Test methods. Determination of water absorption by capillarity. Brussels.

CEN (2010) – EN 998-1 – Specification for mortar for masonry - Part 1: Rendering and plastering mortar. Brussels.

CNR – ICR (1998) - Normal 29/88 - Misura della perdita per evaporazione dell'acqua assorbita dal materiale. Roma.

Cunha, S.; Alves, V.; Aguiar, J.; Ferreira, V. (2012) – Argamassas térmicas sustentáveis: o contributo dos materiais de mudança de fase. 4º Congresso Português de Argamassas e ETICS, Coimbra, Portugal (CD).

Dias, I. (2013) – Desenvolvimento e caracterização de argamassas de cal aérea e terra: a influência da terra como agregado parcial. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil – Perfil de Construção, Faculdade de Ciências e Tecnologias, Universidade Nova de Lisboa.

Dubosc, A.; Escadeillas, G.; Blanc, P. (2001) – Characterization of biological stains on external concrete walls and influence of concrete as underlying material. *Cement and Concrete Research*, vol. 31, 1613-1617.

Eires, R.; Cardoso, C.; Camões, A. (2014) – Argamassas de terra e cal reforçadas com fibras naturais. Congresso Luso-Brasileiro de Materiais de Construção Sustentáveis, Guimarães, Portugal (CD).

Faria, P. (2004) – Argamassas de revestimento para alvenarias antigas: Contributo para o estudo da influência dos ligantes. Tese de Doutoramento em Engenharia Civil – Especialidade em Reabilitação do Património Edificado, Faculdade de Ciências e Tecnologias, Universidade Nova de Lisboa.

Faria, P. (2007) – Construções em terra crua. Tecnologias, potencialidades e patologias. Fórum Museológico do Distrito de Setúbal e Museu de Arqueologia e Etnografia do Distrito de Setúbal. *Revista MUSA*, vol. 2, 149-155.

Faria, P.; Henriques, F.; Rato, V. (2008) – Comparative evaluation of lime mortars for architectural conservation. *Journal of Cultural Heritage*, vol. 9, 338-346.

Faria, P. (2012) – Argamassas sustentáveis. 2ª Conferência CRSEEL, FCT-UNL, Caparica, Setúbal, Portugal (CD).

Faria, P.; Silva, V.; Jamú, N.; Dias, I.; Gomes, I. (2013) - Evaluation of air lime and clayish earth mortars for earthen wall renders, *Vernacular Heritage and Earthen Architecture: Contributions for Sustainable Development*, CRC Press / Taylor & Francis Group, 407-413.

Faria, P.; Dias, I.; Jamú, N.; Silva, V. (2014) - Air lime-earth blended mortars: assessment on fresh state and workability. *International Conference on Vernacular Heritage, Sustainability and Earthen Architecture, VerSus 2014 | 2nd MEDITERRA | 2nd ResTAPIA*, 11-13 September, Valencia, Spain *Earthen Architecture – Past, Present and Future*. C. Mileto, F. Vegas, L. Garcia Soriano, V. Cristini (Eds.), 2015 Taylor & Francis Group, London, p. 133-138.

Flores-Colen, I. (2014) – A nanotecnologia nas argamassas de construção. Workshop “A Nanotecnologia nos Materiais de Construção”. Ordem dos Engenheiros, Lisboa, Portugal.

- Gadelmawla, E.; Koura, M.; Maksoud, T. Elewa, I.; Soliman, H. (2002) – Roughness parameters. *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 123, 133-145.
- Galán-Marín, C.; Rivera-Gómez, C.; Petric, J. (2010) - Clay-based composite stabilized with natural polymer and fibre. *Construction and Building Materials*, vol. 24, 1462-1468.
- Gameiro, A.; Santos-Silva, A.; Faria, P.; Grilo, J.; Branco, T.; Veiga, R.; Velosa, A. (2014) – Physical and chemical assessment o fair lime-metakaolin mortars: Influence of binder:aggregate ratio. *Cement and Concrete Composites*, vol. 45, 264-271.
- Giannantonio, D.; Kurth, J.; Kurtis, K.; Sobecky, P. (2009) – Effects of concrete properties and nutrients on fungal colonization and fouling. *International Biodeterioration & Biodegradation*, vol. 63, 252-259.
- Gomes, M.; Gonçalves, T.; Faria, P. (2013) – The compatibility of earth-based repair mortars with rammed earth substrates. 3rd Historic Mortars Conference, Glasgow, Scotland (CD).
- Gomes, M. (2013) – Conservação de construções de taipa: argamassas de reparação. Tese de Doutoramento em Engenharia Civil – Especialidade em Ciências da Construção, Faculdade de Ciências e Tecnologias, Universidade Nova de Lisboa.
- Gomes, M.; Gonçalves, T.; Faria, P. (2014) – Unstabilished rammed earth: characterization of the material collected from old constructions in South Portugal and comparison to normative requirements. *International Journal of Architectural Heritage*, Taylor & Francis 8 (2), 1-28.
- Gomes, M.; Faria, P. (2011) – Repair mortars for rammed earth constructions. *Proceedings of the XII DBMC – 12th International Conference on Durability of Building Materials and Components*, V.P Freitas, H.Corracho, M.Lacasse (eds.), vol. 2, 689-696, FEUP, Porto.
- Grilo, K.; Faria, P.; Veiga, R.; Silva, A.; Silva, V.; Velosa, A. (2014) – New natural hydraulic lime mortars – Physical and microstructural properties in diferent curing conditions. *Construction and Building Materials*, vol. 54, 378-384.
- Hamard, E.; Morel, J.; Salgado, F.; Marcom, A.; Meunier, N. (2013) - A procedure to assess the suitability of plaster to protect vernacular earthen architecture. *Journal of Culture Heritage*, vol. 14, 109-115.
- Henriques, F.; Charola, A.; Rato, V.; Faria, P. (2007) – Development of biocolonization resistant mortars: preliminary results. *Restoration of Buildings and Monuments*, vol. 13, 1-12.
- IPQ (2007) – NP EN 14146:2006 – Métodos de ensaio para pedra natural. Determinação do módulo de elasticidade dinâmico (através da medição da frequência de ressonância fundamental). Caparica, Portugal.

IPQ (2008) – NP EN 1936:2008 – Métodos de ensaio para pedra natural. Determinação das massas volúmicas real e aparente e das porosidades total e aberta. Caparica, Portugal.

IPQ (2011) – NP EN 459-1:2011 – Cal de construção. Parte 1: Definições, especificações e critérios de conformidade. Caparica, Portugal.

ISO (2012) – ISO 25178-2:2012 – Geometrical product specification – Part 2: Terms, definitions and surface texture parameters. Switzerland.

Jamú, N. (2013) – Desenvolvimento e caracterização de argamassas de cal aérea e terra: a influência da terra como ligante. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil – Perfil de Construção, Faculdade de Ciências e Tecnologias, Universidade Nova de Lisboa.

Jornet, A.; Somaini, M.; Romer, A.; Corredig, G. (2013) - Lime mortar for renders: finishing techniques and properties. 3rd Historic Mortars Conference, Glasgow, Scotland (CD).

Kita, Y. (2013) - The functions of vegetable mucilage in lime and earth mortars - a review. HMC 2013 - 3rd Historic Mortars Conference, Glasgow, Scotland (CD).

Lajili, H.; Devillers, P.; Grambun-Lapeyre, C.; Bournazel, J. (2008) - Alteration of a cement matrix subjected to biolixiviation test. Materials and Structures, vol. 41, 1633-1645.

Lima, J. (2013) – O contributo das argamassas de barro para a qualidade do ambiente interior dos edifícios: o caso das argilas do sotavento algarvio. 2º Congresso Internacional da Habitação no Espaço Lusófono, Lisboa, LNEC (CD).

Magniont, C.; Coutand, M.; Bertron, A.; Cameleyre, X.; Lafforgue, C.; Beauforte, S.; Escadeillas, G. (2011) – A new test method to assess the bacterial deterioration of cementitious materials. Cement and Concrete Research, vol. 41, 429-438.

Martínez-Ramírez, S.; Puertas, F.; Blanco-Varela, M.; Thompson, G. (1997) – Studies on degradations of lime mortars in atmospheric simulation chambers. Cement and Concrete Research, vol. 27, 777-784.

Martins, M.; Nunes, L.; Branco, F. (2011) – Plastering and rendering mortars incorporating reggranulated of expanded cork to improve durability. XII DBMC - 12th International Conference on Durability of Building Materials and Components, vol. III, V. Peixoto de Freitas, H. Corvacho, M. Lacasse (eds.), Porto, FEUP, 1361-1368.

Memon, S. (2014) – Phase change materials integrated in building walls: A state of the art review. Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 31, 870-906.

- Meshgin, P.; Xi, Y.; Li, Y. (2012) - Utilization of phase change materials and rubber particles to improve thermal and mechanical properties of mortar. *Construction and Building Materials*, vol. 28, 713-721.
- Minke, G.; Ziegert, C. (2008) – DVL Technical Information Sheet. “The requirements of clay plasters”. 5th International Conference on Building with Earth, LEHM 2008, Koblenz, Germany, 9-12 October: Dachverband, Lehm e.V.:23-31.
- Morton, T. (2004) – Earth structures, renders and plasters: Experiments in historical techniques and weathering. In 4th International Conference on Building with Earth, LEHM 2004, Weimar, Germany, 29-30 October, Dachverband Lehm e.V.:272-275.
- Morton, T.; Little, R. - Conserving earth mortared monuments in a damp climate. HMC 2013 - 3rd Historic Mortars Conference, Glasgow, Scotland (CD).
- NABau (2013) – DIN 18947 – Earth plasters – Terms and definitions, requirements, test methods. Berlin.
- Perfettini, J.; Revertegat, E.; Langomazino, N. (1991) – Evaluation of cement degradation induces by the metabolic products of two fungal strains. *Experientia*, vol. 47, 527-533.
- Pina dos Santos, C.; Matias, L. (2006) - Coeficientes de transmissão térmica de elementos da envolvente dos edifícios - ITE 50, LNEC, Lisboa.
- RILEM (1980) – Recommended tests to measure the deterioration of stone and to assess the effectiveness of treatment methods. Test nº II.5 – Evaporation curve. *Materials & Structures*, 13, 204-207.
- Rohlen, Ulrich (2012) – Mould on Clay Renders. In 6th International Conference on Building with Earth, LEHM 2012, Weimar, Germany, 5-7 October: Dachverband Lehm e.V.: 113-121.
- Rohlen, U.; Ziegert, C. (2011) – Earth building practice, Bauwerk, Beuth Verlag GmbH.
- Santos, P. (2014a) – Caracterização de argamassas de cal aérea e terra: a influência do traço e tipo de fibra natural. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil – Perfil de Construção, Faculdade de Ciências e Tecnologias, Universidade Nova de Lisboa.
- Santos, T. (2014b) – Argamassas de terra para rebocos interiores: ensaios de caracterização e influência da formulação. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil – Perfil de Construção, Faculdade de Ciências e Tecnologias, Universidade Nova de Lisboa.
- Sharma, A.; Tyagi, V.; Chen, C.; Buddhi, D. (2009) – Review on thermal energy storage with phase change materials and applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol.13, 318-345.

Shirakawa, M.; Beech, I.; Tapper, R.; Cincotto, M.; Gambale, W. (2003) – The development of a method to evaluate bioreceptivity of indoor mortar plastering to fungal growth. *International Biodeterioration & Biodegradation*, vol. 51, 83-92.

Silva, A. (2008) – Argamassas: Conceito, tipos e funções. Palestra “Comunidade da Construção – Sistemas à base de cimento”, Salvador, Brasil.

Teixeira, M.; Nunes, L.; Santos, P.; Jamú, N.; Faria, P. (2014) – Argamassas de reboco com cal aérea, terra e fibras naturais: avaliação preliminar da suscetibilidade à contaminação biológica. 1º Simpósio de Argamassas e Soluções Térmicas de Revestimento, Coimbra, Portugal (CD).

Tran, T.; Govin, A.; Guyonnet, R.; Grosseau, P.; Lors, C.; Damidot, D.; Devès, O.; Ruot, B. (2013) – Avrami's law based kinetic modelling of colonization of mortar surface by alga *Klebsormidium flaccidum*. *International Biodeterioration & Biodegradation*, vol. 79, 73-80.

Tran, T.; Govin, A.; Guyonnet, R.; Grosseau, P.; Lors, C.; Damidot, D.; Devès, O.; Ruot, B. (2013) – Influence of the intrinsic characteristics of mortars on their biofouling by pigmented organisms: Comparison between laboratory and field-scale experiments. *International Biodeterioration & Biodegradation*, vol. 86, 334-342.

Tran, T.; Govin, A.; Guyonnet, R.; Grosseau, P.; Lors, C.; Garcia-Diaz, E.; Damidot, D.; Devès, O.; Ruot, B. (2013) – Influence of the intrinsic characteristics of mortars on biofouling by *Klebsormidium flaccidum*. *International Biodeterioration & Biodegradation*, vol. 70, 31-39.

Veiga, M.; Faria, P. (1990) – Revestimentos de ligantes minerais e mistos com base em cimento, cal e resina sintética. In *Curso de Especialização sobre Revestimentos de Paredes*. 1º Módulo. LNEC, Lisboa, 40-173.

Veiga, M.; Fragata, A.; Velosa, A.; Magalhães, A.; Margalha, G. (2010) – Lime-based mortars: viability for use as substitution renders in historical buildings. *International Journal of Architectural Heritage: Conservation, Analyses and Restoration*, vol. 4, 177-195.

Wiktor, V.; De Leo, F.; Urzì, C.; Guyonnet, R.; Grosseau, Ph.; Garcia-Diaz, E. (2009) – Accelerated laboratory test to study fungal biodeterioration of cementitious matrix. *International Biodeterioration & Biodegradation*, vol. 63, 1061-1065.

Yousefi, A.; Allahverdi, A.; Hejazi, P. (2014) – Accelerated biodegradation of cured cement paste by *Thiobacillus* species under simulation condition. *International Biodeterioration & Biodegradation*, vol. 86, 317-326.

Zalba, B.; Marín, J.; Cabeza, L.; Mehling, H. (2003) – Review on thermal energy storage with phase change: materials, heat transfer analysis and applications. *Applied Thermal Engineering*, vol.23, 251-283.

Zappia, G.; Sabbioni, C.; Riontino, C. Gobbi, G.; Favoni, O. (1998) – Exposure tests of building materials in urban atmosphere. *The Science of the Total Environment*, vol. 224, 235-244.

Ziegert, C.; Kuban, S. (2011) - Relatório de teste 11045a - Análise de argila para construção, reboco de argila EMBARRO Universal. Seiler Ingenieure GmbH, Laboratório Ziegert, Maio 2011.

Anexos

A.1 – Caracterização dos materiais utilizados

- Composição mineralógica

Material (%)	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₆	L.O.I.*
Cal aérea	-	0,01	0,15	0,01	3,09	76,74	-	0,02	0,04	0,01	20,45

*Loss on ignition (perda ao fogo)

Compostos cristalinos identificados	Terra argilosa - Sorgila
Quartzo	+++
Feldspatos	Vtg
Mica	Vtg
Clorite	?
Caulinite	++
Geotite	+
Anatase	+ / Vtg

Notação: +++ proporção elevada; ++ proporção média; + proporção fraca; Vtg vestígios; ? dúvidas na presença; - não identificado

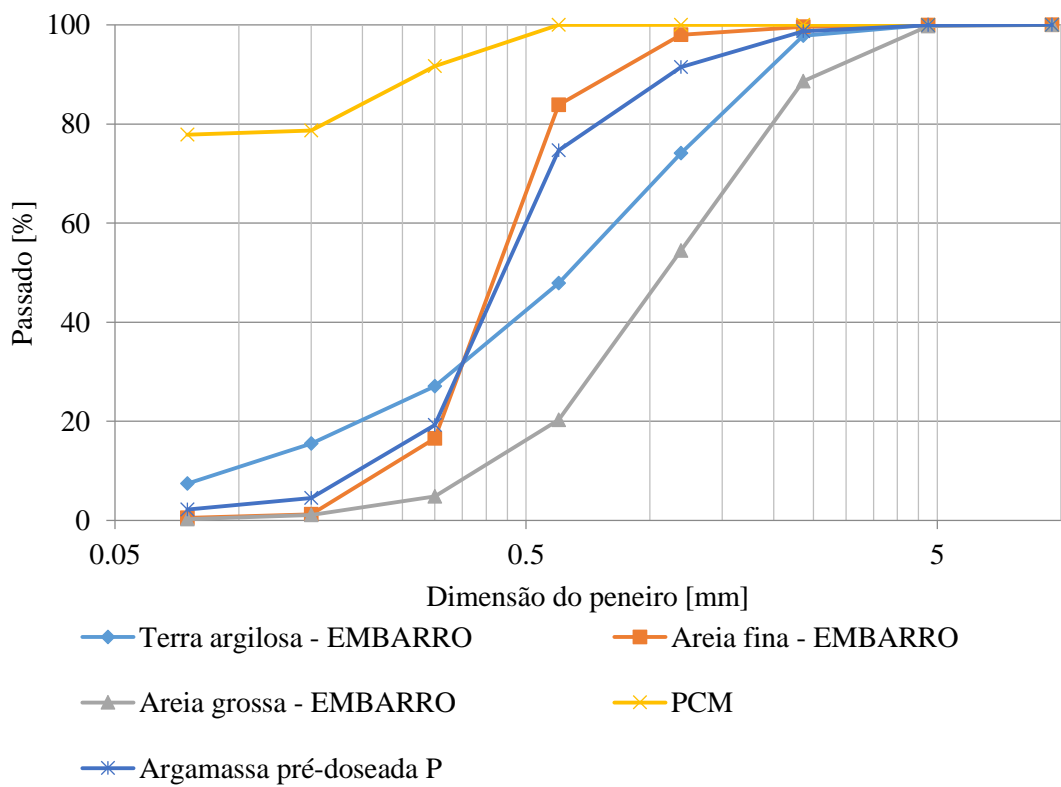
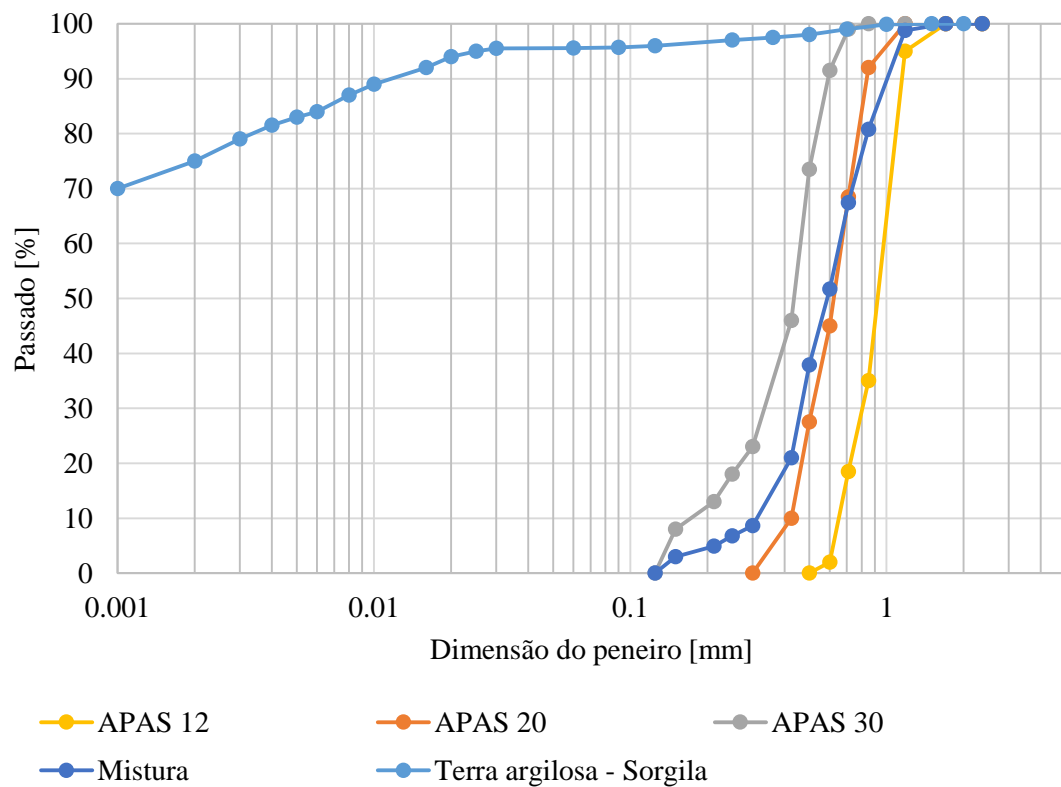
Compostos cristalinos identificados	Terra argilosa - EMBARRO
Quartzo	+++
Hematite	+
Ilite	+
Albite	±
Dolomite	++
Calcite	+

Notação: +++ alto; ++ intermédio; + baixo; ± indícios

- Baridade dos constituintes utilizados (Santos, 2014a e Santos, 2014b)

Constituinte	Baridade [kg/dm ³]
Areia APAS 12	1,41
Areia APAS 20	1,41
Areia APAS 30	1,39
Mistura de areias (1:1:1,5)	1,46
Terra argilosa - Sorgila	1,08
Cal aérea	0,36
Terra argilosa – EMBARRO	1,46
Areia fina – EMBARRO	1,50
Areia grossa – EMBARRO	1,50
Argamassa pré-doseada P	1,54
Fibras	0,07
PCM	1,02

- Curvas granulométricas




A.2 – Ficha técnica do PCM

Provisional Technical Information

Micronal® DS 5040 X

Polymer Dispersions for Construction



BASF
The Chemical Company

Characteristic/Chemie

Dry powder version of a paraffin wax mixture encapsulated in highly cross-linked polymethylmethacrylate, free of formaldehyde

Area of application


Micronal DS 5040 X is a microencapsulated phase-change material with a high thermal capacity that is used to store latent heat. It is the spray-dried version of Micronal DS 5030 X, which is supplied as an aqueous dispersion. It consists of microscopic polymer spheres with a core made from highly refined paraffin wax. Micronal DS 5040 X can be incorporated in products such as conventional, thick-layer plaster, plasterboard, fillers, floor screeds and concrete, etc., based on hydraulic and non-hydraulic binders. It can also be incorporated in wood products such as MDF and OSB and in coatings such as acrylic paints in order to increase their thermal capacity. It stores the latent heat that is absorbed when the wax in the microcapsules changes phase from solid to liquid, and the heat is released again when the wax solidifies. An advantage of the special microencapsulation process that is used to manufacture Micronal DS 5040 X is that the product is free of formaldehyde.

time that it becomes available and then release it later when it is in demand. This enables energy to be managed more efficiently in processes such as geothermal cooling systems. Water or air can be used as the heat transfer medium when the process is reversed at night. The maximum loads on cooling systems can be reduced, which makes technical building services more energy-efficient. Ideally, active air conditioning can be dispersed with completely.


Technical Data

Physical form	Powder
Particle size	ca. 50–300 µm
Bulk density	ca. 300–400 kg/m³
Melting point	ca. 23 °C
Enthalpy of fusion	ca. 95 kJ/kg
Thermal capacity (Integral, 10–30 °C)	ca. 136 kJ/kg
Other features	Low dusting

The exact specifications can be found in the specification data sheet.



Electron micrograph of Micronal DS 5040 X. The powder particles consist of agglomerated microcapsules.



In interior applications, the aim is to keep the room temperature stable at 23 °C for a large part of the year in order to improve comfort and to reduce peak demand for cooling and heating.

Micronal DS 5040 X can be employed passively or in combination with an active cooling system. Phase-change materials are a useful element of climate control concepts, because they make it possible to store energy at the

It is essential that customers perform their own tests when products based on Micronal DS 5040 X are being manufactured and processed, because the compatibility of the various ingredients with each other, the curing behavior of hydraulic binders, their adhesion on different substrates and their material properties, etc., depend on numerous different factors that we are unable to cover exhaustively in our own tests.

Micronal DS 5040 X is supplied in bags with a net weight of 30 kg. As a protective measure, the powder is virtually dust-free. The usual precautions must be taken when working with products in powder form.

For transport and storage the product is subject to the regulations of class 4.2, packing group II.

A.3 – Resultados experimentais obtidos nos ensaios preliminares

- Contaminação biológica

Argamassa		Semana 1	Semana 2	Semana 3	Semana 4
CL2	P1	0	0	0	0
	P2	0	0	1	1
	P3	0	0	0	1
CL2-25t	P1	0	0	1	1
	P2	0	0	1	1
	P3	0	0	1	1
CL2-25t+9ca	P1	0	1	1	2
	P2	0	0	1	1
CL2-25t+5cc	P1	0	0	0	1
	P2	0	0	0	0
	P3	0	0	1	2
CL2-25t+2rl	P1	0	0	1	1
	P2	0	0	0	1
	P3	0	1	1	1
Controlo	P1	3	3	4	4
	P2	3	4	4	4
	P3	3	4	4	4

A.4 – Resultados experimentais obtidos na fase 1 de ensaios

- Rugosidade

Argamassa		Sa (mm)			Sz (mm)			Sp (mm)			Sv (mm)		
		Individual	Média	Desv. Pad.	Individual	Média	Desv. Pad.	Individual	Média	Desv. Pad.	Individual	Média	Desv. Pad.
P	1	0.21	0.23	0.04	2.85	3.58	1.03	1.29	1.22	0.10	1.56	2.35	1.13
	2	0.26			4.30			1.15			3.15		
FS	1	0.33	0.27	0.09	4.56	3.55	1.43	1.04	0.89	0.20	3.52	2.66	1.22
	2	0.20			2.54			0.75			1.79		
FS_PCM20	1	0.26	0.24	0.03	2.22	2.18	0.05	1.22	1.24	0.03	1.00	0.94	0.08
	2	0.22			2.15			1.26			0.89		
CS_PCM20	1	0.24	0.33	0.13	2.64	2.52	0.17	1.39	1.41	0.04	1.25	1.11	0.21
	2	0.43			2.40			1.44			0.96		
CS30_FS45	1	0.19	0.19	0.00	3.92	3.99	0.09	1.13	1.58	0.65	2.80	2.40	0.56
	2	0.19			4.05			2.04			2.01		
CS30_FS25_PCM20	1	0.33	0.26	0.09	2.18	3.96	2.52	1.31	1.05	0.37	0.86	2.91	2.89
	2	0.20			5.74			0.78			4.96		
CS30_FS15_PCM30	1	0.38	0.31	0.10	2.09	1.97	0.17	1.42	1.28	0.20	0.67	0.69	0.03
	2	0.23			1.84			1.14			0.71		
CS30_FS45+F5	1	0.46	0.46	0.01	2.67	4.40	2.44	1.26	2.49	1.74	1.41	1.91	0.71
	2	0.47			6.13			3.72			2.41		

- pH

Argamassa	P	FS	FS_PCM20	CS_PCM20	CS30_FS45	CS30_FS25_PCM20	CS30_FS15_PCM30	CS30_FS45+F5
pH	8.87	8.69	8.61	8.77	8.93	8.57	8.53	8.99

- Contaminação biológica

Argamassa		Resultados							
Denominação	Provete	Semana 1		Semana 2		Semana 3		Semana 4	
P	1	2	1,8	2	1,8	2	2,4	2	2,6
	2	2		2		2		3	
	3	2		2		3		3	
	4	1		1		2		2	
	5	2		2		3		3	
FS	1	0	0,6	0	0,8	0	1,4	1	2,4
	2	1		1		2		3	
	3	0		0		0		2	
	4	1		2		3		3	
	5	1		1		2		3	
FS_PCM20	1	1	1,4	2	2	3	2,8	3	3,2
	2	2		2		3		4	
	3	2		3		4		4	
	4	1		1		2		2	
	5	1		2		2		3	
CS_PCM20	1	2	2,2	2	3	3	3,4	3	3,6
	2	2		3		3		3	
	3	2		3		3		4	
	4	3		4		4		4	
	5	2		3		4		4	
CS30_FS45	1	0	0,6	0	0,8	0	1,6	0	1,6
	2	1		1		2		2	
	3	0		0		0		0	
	4	1		1		3		3	
	5	1		2		3		3	
CS30_FS25_PCM20	1	3	2,2	4	3,2	4	3,6	4	4
	2	2		3		4		4	
	3	2		3		4		4	
	4	2		3		3		4	
	5	2		3		3		4	
CS30_FS15_PCM30	1	2	1,2	2	1,4	3	2,2	4	3
	2	2		2		2		3	
	3	0		0		0		1	
	4	1		2		3		3	
	5	1		1		3		4	
CS30_FS45+F5	1	2	1,4	2	1,8	3	2,6	3	3,4
	2	1		2		2		2	
	3	2		2		2		4	
	4	1		2		3		4	
	5	1		1		3		4	

Argamassa		Resultados							
Denominação	Provete	Semana 1		Semana 2		Semana 3		Semana 4	
Controlo	1	4	3,7	4	4	4	4	4	4
	2	3		4		4		4	
	3	4		4		4		4	

A.5 – Resultados experimentais obtidos na fase 2 de ensaios

- Consistência por espalhamento e massa volúmica (estado fresco)

Argamassa	Consistência por espalhamento (mm)			Massa volúmica (kg/dm ³)
	Leituras	Média	DP	Leitura
CS30_FS45+F5+CL5	175	175	1,00	1,928
	176			
	174			
CS30_FS15_PCM30+CL5	177	176.7	0,58	1,609
	176			
	177			

- Massa volúmica aparente (estado endurecido) e condutibilidade térmica

Argamassas		Massa volúmica aparente (kg/dm³)	Condutibilidade térmica (W/m.K)					
Denominação	Provete	Leituras	Leituras			Média		DP
CS30_FS45+F5+CL5	1	1.665	0.588	0.531	0.573	0.564	0.576	0.018
	2	1.674	0.61	0.594	0.586	0.597		
	3	1.673	0.545	0.566	0.591	0.567		
CS30_FS15_PCM30+CL5	1	1.435	0.367	0.387	0.375	0.376	0.367	0.017
	2	1.432	0.369	0.339	0.334	0.347		
	3	1.437	0.415	0.345	0.371	0.377		

- Módulo de Elasticidade Dinâmico

Argamassa		Módulo de Elasticidade Dinâmico (MPa)						
Denominação	Provetes	Leituras				Média		DP
CS30_FS45+F5+CL5	1	1556	1957	1495	1781	1644.8	1577.3	70.7
		1484	1668	1498	1719			
	2	1496	1682	1488	1668	1583.4		
		1501	1704	1488	1640			
	3	1439	1535	1398	1584	1503.8		
		1440	1603	1439	1592			
CS30_FS15_PCM30+CL5	1	1197	1155	1154	-	1168.7	1182.0	11.6
	2	1227	1186	1137	1201	1187.8		
	3	1218	1206	1189	1145	1189.5		

- Resistência à tração por flexão e à compressão

Argamassa		Resistência à tração por flexão				Resistência à compressão			
Denominação	Provete	Ft (N)	Rt (MPa)	Média	DP	Fc (N)	Rc (MPa)	Média	DP
CS30_FS45+F5+CL5	1	37.25	0.087	0.089	0.018	290.14	0.181	0.221	0.038
	2	45.78	0.107			412.64	0.257		
	3	30.87	0.072			358.26	0.223		
CS30_FS15_PCM30+CL5	1	15.37	0.036	0.033	0.004	333.03	0.208	0.198	0.009
	2	12.22	0.028			311.16	0.194		
	3	14.91	0.034			304.44	0.190		

- Absorção de água por capilaridade

Tempo (min ^{0,5})	CS30_FS45+F5+CL5					CS30_FS15_PCM30+CL5				
	P1	P2	P3	Média	DP	P1	P2	P3	Média	DP
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1.41	6.47	6.61	6.55	6.54	0.07	3.88	4.67	4.38	4.31	0.40
2.00	7.87	7.70	7.97	7.85	0.14	4.49	5.43	4.87	4.93	0.47
2.45	8.64	8.15	8.21	8.33	0.27	5.06	5.86	5.72	5.55	0.43
2.83	8.59	8.27	8.41	8.42	0.16	5.52	6.39	6.34	6.08	0.49
3.16	8.78	8.38	8.51	8.56	0.20	5.88	6.77	6.57	6.41	0.46
4.47	8.55	8.44	8.64	8.54	0.10	7.16	8.31	8.04	7.83	0.60
5.48	8.70	8.47	8.58	8.58	0.11	8.19	8.66	8.60	8.48	0.26
7.75	8.81	8.29	8.31	8.47	0.30	8.23	8.58	8.49	8.43	0.18
10.95	8.94	8.45	8.75	8.71	0.25	8.70	8.98	8.76	8.81	0.15
13.42	8.89	8.54	8.79	8.74	0.18	8.93	9.20	8.86	9.00	0.18
15.49	8.87	8.51	8.75	8.71	0.18	8.93	9.12	9.02	9.02	0.09
CC (kg/(m ² .min ^{0,5}))	2.11	1.50	1.65	1.75	0.32	1.06	1.02	1.08	1.05	0.03
VA (kg/m ²)	8.94	8.47	8.75	8.71	0.23	8.70	8.98	8.76	8.81	0.15

- Secagem

Índice de secagem (-)										
Tempo [h]	CS30_FS45+F5+CL5					CS30_FS15_PCM30+CL5				
	P1	P2	P3	Média	DP	P1	P2	P3	Média	DP
0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1	12.63	12.58	12.66	12.62	0.04	14.20	15.28	14.42	14.64	0.57
2	12.17	12.11	12.17	12.15	0.03	13.66	14.72	13.80	14.06	0.57
3	11.73	11.65	11.68	11.69	0.04	13.15	14.19	13.21	13.52	0.59
4	11.34	11.25	11.25	11.28	0.06	12.69	13.75	12.71	13.05	0.60
5	10.94	10.81	10.79	10.85	0.08	12.24	13.28	12.20	12.58	0.61
26	142.85	137.87	137.86	139.52	2.88	193.40	204.76	188.41	210.38	8.38
51	49.92	44.09	44.05	46.02	3.38	136.22	133.44	125.70	131.79	5.45
76	21.91	18.94	18.56	19.80	1.83	98.12	89.44	86.39	91.32	6.08
124	23.12	21.31	21.88	22.10	0.93	129.16	107.11	104.54	113.60	13.54
148	7.62	8.18	8.83	8.21	0.61	41.67	30.48	30.21	34.12	6.54
172	6.56	7.36	8.05	7.32	0.75	30.56	21.05	21.18	24.26	5.46
195	5.05	6.00	6.70	5.92	0.83	20.76	14.11	14.34	16.40	3.78
218	4.45	5.44	6.01	5.30	0.79	14.60	10.68	10.85	12.04	2.21
IS (-)	0.12	0.11	0.11	0.12	0.00	0.24	0.21	0.21	0.22	0.02

Taxa de secagem (kg/(m ² .h))										
Tempo [h]	CS30_FS45+F5+CL5					CS30_FS15_PCM30+CL5				
	P1	P2	P3	Média	DP	P1	P2	P3	Média	DP
0	8.46	8.01	8.30	8.26	0.23	8.41	8.74	8.33	8.50	0.22
1	8.17	7.75	8.00	7.97	0.22	8.11	8.44	8.00	8.18	0.23
2	7.85	7.43	7.66	7.65	0.21	7.78	8.11	7.63	7.84	0.24
3	7.59	7.17	7.38	7.38	0.21	7.51	7.85	7.33	7.56	0.26
4	7.34	6.92	7.10	7.12	0.21	7.26	7.61	7.06	7.31	0.28
5	7.07	6.63	6.80	6.83	0.22	6.98	7.33	6.76	7.02	0.29
26	1.89	1.60	1.65	1.71	0.16	3.73	3.63	3.40	3.59	0.17
51	0.74	0.61	0.61	0.66	0.07	2.60	2.37	2.29	2.42	0.16
76	0.41	0.33	0.34	0.36	0.04	1.96	1.66	1.62	1.75	0.19
124	0.22	0.22	0.25	0.23	0.01	1.17	0.85	0.85	0.96	0.18
148	0.20	0.21	0.23	0.21	0.02	0.85	0.58	0.58	0.67	0.16
172	0.16	0.18	0.20	0.18	0.02	0.63	0.41	0.42	0.49	0.12
195	0.13	0.15	0.17	0.15	0.02	0.42	0.28	0.29	0.33	0.08
218	0.13	0.15	0.17	0.15	0.02	0.32	0.24	0.25	0.27	0.04
TS	0.25	0.24	0.25	0.25	0.00	0.17	0.19	0.17	0.18	0.01

- pH

Argamassas	CS30_FS45+F5+CL5	CS30_FS15_PCM30+CL5
pH	9.44	9.56

- Rugosidade

Argamassas		Sa (mm)			Sz (mm)			Sp (mm)			Sv (mm)		
		Individual	Média	DP	Individual	Média	DP	Individual	Média	DP	Individual	Média	DP
CS30_FS45+F5+CL5	1	0.387	0.313	0.10	2.721	2.632	0.13	1.188	0.990	0.28	1.533	1.642	0.15
	2	0.239			2.543			0.792			1.751		
CS30_FS15_PCM30+CL5	1	0.493	0.395	0.14	2.787	2.740	0.07	1.302	1.218	0.12	1.484	1.522	0.05
	2	0.296			2.692			1.133			1.559		

- Contaminação biológica

Argamassa		Resultados							
Denominação	Provete	Semana 1		Semana 2		Semana 3		Semana 4	
CS30_FS45+F5+CL5	1	1	0,6	1	0,8	1	1	1	1
	2	1		1		1		1	
	3	1		1		1		1	
	4	0		1		1		1	
	5	0		0		1		1	
CS30_FS15_PCM30+CL5	1	0	0,2	0	0.6	0	0,8	0	0,8
	2	0		0		0		0	
	3	1		3		4		4	
	4	0		0		0		0	
	5	0		0		0		0	
Controlo	1	3	3	4	4	4	4	4	4
	2	3		4		4		4	
	3	3		4		4		4	

A.6 – Resultados obtidos por Pedro Santos (2014) e Tânia Santos (2014)

- Síntese de resultados obtidos por Pedro Santos (2014a)

Ensaio	Unid.	CL2	CL2-25t	CL2-25t+9ca	CL2-25t+5cc	CL2-25t+2rl
MV _{aparente}	[kg/dm ³]	1525,9	1548,2	1256,2	1424,6	1487,8
λ	[W/(m.K)]	0,691	0,684	0,545	0,673	0,626
Ed	[MPa]	2452,7	2435,5	1624,4	2329,9	2012,5
Rc	[MPa]	0,58	0,53	0,43	0,59	0,57
Rt	[MPa]	0,27	0,25	0,16	0,25	0,22

- Síntese de resultados obtidos por Tânia Santos (2014b)

Ensaio	Unid.	P	FS	FS_PCM20	CS_PCM20	CS30_FS45	CS30_FS25_PCM20	CS30_FS15_PCM30	CS30_FS45+F5
MV _{aparente}	[kg/dm ³]	1,77±0,00	1,78±0,02	1,18±0,05	1,57±0,03	1,79±0,00	1,33±0,04	1,27±0,04	1,72±0,02
λ	[W/(m.K)]	0,9±0,1	0,8±0,1	0,4±0,2	0,6±0,0	0,8±0,1	0,4±0,1	0,5±0,1	0,7±0,1
Ed	[MPa]	4331±25	3889±65	1366±91	2989±210	3933±161	1920±28	370±48	3838±57
Rt	[MPa]	0,24±0,00	0,20±0,01	0,10±0,01	0,12±0,01	0,22±0,01	0,10±0,01	0,09±0,04	0,19±0,01
Rc	[MPa]	0,55±0,02	0,57±0,01	0,28±0,04	0,48±0,02	0,56±0,02	0,32±0,01	0,42±0,02	0,43±0,05
Cap.	CC [kg/(m ² .min ^{0,5})]	0,41±0,06	0,31±0,02	0,86±0,71	0,41±0,04	0,40±0,04	0,91±0,12	0,65±0,39	0,40±0,02
Sec.	TS [kg/(m ² .h)]	0,18±0,02	0,19±0,01	0,27±0,01	0,13±0,01	0,23±0,04	0,33±0,01	0,25±0,07	0,23±0,01
	IS [-]	0,23±0,02	0,23±0,01	0,21±0,00	0,30±0,01	0,15±0,03	0,23±0,14	0,22±0,01	0,17±0,01

A.7 – Artigo realizado no âmbito da conferência “Argamassas 2014”

ARGAMASSAS DE REBOCO COM CAL AÉREA, TERRA E FIBRAS NATURAIS: AVALIAÇÃO PRELIMINAR DA SUSCETIBILIDADE À CONTAMINAÇÃO BIOLÓGICA

Miguel Teixeira¹, Lina Nunes², Pedro Santos¹, Naila Jamú¹, Paulina Faria^{3*}

1: Dep. Eng. Civil, FCT, Universidade Nova de Lisboa
2829-516 Caparica

m.teixeira@campus.fct.unl.pt, pa.santos@campus.fct.unl.pt, nailaspj@gmail.com

2: Laboratório Nacional de Engenharia Civil
Av. do Brasil, 101, 1700-066 Lisboa
linanunes@lnec.pt

3: UNIC, Dep. Eng. Civil, FCT, Universidade Nova de Lisboa
2829-516 Caparica
paulina.faria@fct.unl.pt

Palavras-chave: Reboco, Argamassa, Cal aérea, Terra, Fibra natural, Deterioração por fungo

Resumo. Os rebocos constituem principalmente a proteção exterior e interior de elementos de alvenaria. Podem ser eles próprios protegidos por sistemas de pintura ou ficarem diretamente expostos. São constituídos por sistemas em que são aplicadas camadas sucessivas de argamassa. As argamassas são por sua vez constituídas por ligantes e agregados e, eventualmente, adições e adjuvantes. Geralmente constituem camadas de espessura relativamente pequena (da ordem dos 2 cm) mas podem ser aplicados em espessuras superiores, nomeadamente quando se pretendem maiores contributos de isolamento térmico.

Para melhorar o seu comportamento, as argamassas para reboco podem ser aditivadas através da utilização de fibras naturais. A ecoeficiência desta prática deve-se à eventual otimização de características conseguida mas também devido ao facto dessas fibras poderem ser resultantes de resíduos, tais como casca ou palha de cereais, refugo de lã, penas ou crinas, entre outros. No entanto, particularmente a utilização deste tipo de adições de materiais orgânicos naturais pode apresentar problemas ao nível da suscetibilidade ao desenvolvimento de bolores e outros fungos, que podem colocar em causa a durabilidade das argamassas. Em tempos foram muito utilizadas argamassas mistas de cal aérea e terra. No entanto a sua aplicação caiu em desuso e o conhecimento deste produto é muito reduzido comparativamente, por exemplo, a argamassas apenas de cal aérea.

Pretende-se neste artigo avaliar a suscetibilidade ao desenvolvimento biológico de argamassas de cal aérea, terra e fibras naturais para rebocos. Para tal, é caracterizada uma argamassa só de cal aérea, outra argamassa da qual 25% da massa de cal foi substituída por massa equivalente de terra argilosa e três argamassas também com 25% de terra mas com adição de diferentes percentagens de fibras naturais, nomeadamente de casca de arroz, crina de cavalo e resíduo de lã de ovelha. A caracterização das argamassas é apresentada em termos de consistência no estado fresco, massa volúmica, resistências mecânicas e porosidade aberta, e comparada com a respetiva suscetibilidade ao desenvolvimento biológico de um dos agentes mais típicos de degradação, no caso o bolor *Aspergillus niger*.

Considerando as condições de ensaio utilizadas, verificou-se que o desenvolvimento deste bolor na superfície das argamassas é relativamente limitado embora a adição de fibras naturais possa levar a um aumento dos níveis de contaminação.

1. INTRODUÇÃO

Argamassas de reboco

As argamassas têm diversas utilizações em edifícios, sendo a sua aplicação em sistemas de reboco de paredes uma das mais visíveis. Os rebocos formam a primeira proteção dos edifícios, podendo ter ainda algum contributo para o seu conforto térmico e acústico. Protegem os edifícios da ação de intempéries, garantindo impermeabilização, resistência mecânica e, ainda, o aspeto estético da fachada. Consoante os casos, o reboco pode ficar à vista ou sobre ele ser aplicado um sistema de pintura.

Tradicionalmente os sistemas de reboco eram constituídos pela aplicação de camadas sucessivas de argamassas, com funções e características distintas, nomeadamente chapisco, camada de base e camada de acabamento. O chapisco é utilizado principalmente para a promoção da aderência entre o suporte e a camada seguinte; a camada de base, aplicada sobre o chapisco, tem como principal função a impermeabilização do sistema e a regularização da superfície; por último, a camada de acabamento, que é aplicada sobre a camada de base, permite um melhor aspeto visual e, não fendilhando, uma boa barreira à água líquida. São geralmente aplicados em camadas de espessura relativamente pequena, na ordem dos 2 cm no total [1].

Os rebocos industriais podem ser aplicados eficientemente em menor número de camadas e até numa só camada, no caso dos rebocos monocamada. Quando se pretendem rebocos térmicos, com maior contributo para a melhoria do conforto térmico, as argamassas são mais leves e o reboco é constituído por uma espessura total superior [2].

As argamassas são constituídas por ligantes e agregados podendo, eventualmente, ter adições e adjuvantes. Atualmente existem diversos tipos de ligantes inorgânicos utilizados em construção, que são escolhidos conforme o propósito a que se destinam. Estes ligantes dividem-se em dois grandes grupos: aéreos e hidráulicos. Tal como o próprio nome sugere, o que distingue estes dois grupos é o modo como o ligante adquire presa. No caso dos aéreos a presa é obtida por reação com o dióxido de carbono do ar, enquanto no caso dos hidráulicos essa presa é adquirida por reação com a água. No entanto também existem argamassas sem qualquer destes ligantes. É o caso das argamassas em que a terra argilosa é o agente aglutinante.

Cal aérea

Um dos ligantes utilizados em construção desde os tempos mais antigos é a cal. No passado o conhecimento e adequação da cal ao tipo de utilização pretendido eram obtidos pela experiência dos trabalhadores e aperfeiçoado ao longo dos anos. Com o surgimento do cimento, a utilização da cal em construção caiu em desuso. Contudo, devido às características mecânicas do cimento serem inadequadas em processos de reabilitação, a cal tem recuperado o seu papel principalmente na conservação do património arquitetónico [3].

A cal aérea é atualmente classificada e definida de acordo com a NP EN 459-1 [4]; trata-se de um ligante constituído quase exclusivamente por hidróxido de cálcio, Ca(OH)_2 . O endurecimento das argamassas de cal aérea é lento e ocorre por carbonatação, pelo que necessita da presença de CO_2 e de humidade para o seu transporte pela estrutura porosa da argamassa. Essa condicionante relativa ao endurecimento das argamassas de cal aérea é uma das desvantagens apontadas nas obras atuais.

Encontram-se gamas de valores bem definidos para as características, obtidas aos 90 dias, de argamassas com base em cal aérea para aplicação em edifícios antigos [5].

Terra argilosa

Como material existente em abundância e sem necessidade de tratamentos especiais, a terra é utilizada desde a antiguidade na construção. Com a evolução e aparecimento de ligantes como as cals e os cimentos, o seu uso no fabrico de argamassas e a sua aplicação na construção reduziu ao longo do século XX, nos países mais desenvolvidos. No entanto nunca deixou de ser utilizada em muitos outros países com menores disponibilidades financeiras ou onde estas se encontram distribuídas de forma menos equilibrada. Nas últimas décadas, devido a preocupações essencialmente ecológicas e ao nível da saúde e conforto, tem-se vindo a assistir a um novo interesse relativo à terra como material de construção.

Em Portugal, é possível encontrar muitas construções, nomeadamente de alvenarias, feitas em terra. Muitas destas alvenarias encontram-se com necessidade de serem reabilitadas, particularmente ao nível dos seus rebocos. Assim, urge a necessidade de associar terra a ligantes com melhores propriedades mecânicas mas que, apesar disso, constituam argamassas compatíveis com as características dessas

alvenarias [6].

Além da utilização de terra em argamassas na reabilitação de edifícios do mesmo material [7], tem sido estudada a inclusão deste material em argamassas utilizadas comumente de modo a reduzir o consumo de matérias-primas e o gasto de energia como aglutinante único [8][9] ou em conjunto com a cal aérea [10].

A junção de terra à cal tem como objetivo criar uma argamassa mais ecológica, com menor energia incorporada. Tal situação é conseguida devido ao facto de se conseguirem argamassas com menor consumo de um ligante que tem de ser produzido a partir de rocha extraída e calcinada. Por outro lado, e uma vez que este tipo de argamassas foi muito utilizado no passado, interessa também conhecer as características técnicas que pode apresentar.

Para além das melhorias que podem ser conseguidas com a utilização de terra em argamassas de cal aérea [9], interessa também avaliar eventuais desvantagens, particularmente aquelas que possam colocar em causa a durabilidade de uma argamassa. Avaliar se a terra, como material natural, aumenta o risco de ocorrência de desenvolvimento de bolores e outros fungos poderá ser um desses casos.

Fibras naturais

Com o intuito de melhorar o comportamento das argamassas de reboco, estas podem ser aditivadas através da utilização de fibras naturais. Desde os princípios da construção que é feita introdução de fibras em argamassas, uma vez que os materiais tradicionais de terra incluíam fibras naturais [11]. No caso da cal, tem vindo a ser estudada a inclusão de fibras naturais de modo a melhorar características como a retração das argamassas.

Além das eventuais melhorias no comportamento das argamassas, a adição de fibras tem a vantagem de poder aproveitar resíduos, tais como casca ou palha de cereais, refugo de lã, penas ou crinas. Tal como no caso da adição de terra, interessa avaliar se a utilização de fibras naturais, por se tratarem de materiais naturais, aumenta a bio-recetividade comparativamente a argamassas comuns.

Fatores condicionantes de contaminação biológica

A contaminação biológica de argamassas de reboco pode ocorrer com qualquer tipo de ligante. Contudo, existem alguns com maior tendência para que tal aconteça, devido às suas características.

Existem três fatores ambientais importantes no desenvolvimento biológico: humidade, temperatura e teor em nutrientes [12]. Aliados a estes fatores ambientais juntam-se ainda os que estão associados às características dos rebocos: pH, rugosidade e porosidade.

Valores de humidade relativa elevados beneficiam o desenvolvimento de microrganismos. No caso da temperatura, a existência de valores extremos dificulta o desenvolvimento – a permanência a temperaturas médias constantes torna-se, assim, mais favorável ao crescimento biológico. É ainda necessário existir um teor de nutrientes mínimo para que o crescimento seja estimulado [12].

Em relação aos fatores associados aos rebocos, os mais importantes são o pH e a rugosidade. Uma maior porosidade diminui a resistência da argamassa e aumenta a permeabilidade ao vapor de água, resultando numa maior disposição à colonização [13]. No entanto, estudos realizados por Shirakawa *et. al.* [14] e Tran *et. al.* [15] em argamassas bastardas e de cimento, respetivamente, foi demonstrado que a porosidade tem um efeito mínimo no que diz respeito à colonização biológica.

No que diz respeito ao pH, valores inferiores a 9 permitem a colonização e, por sua vez, valores superiores a 10 inibem o crescimento biológico [14]. No caso da rugosidade, espera-se que uma argamassa com maior rugosidade esteja mais exposta a contaminação, uma vez que possui uma maior superfície de ancoragem para contaminantes [15].

2. ARGAMASSAS E CARACTERIZAÇÃO

Em face do conhecimento que atualmente se tem relativamente a muitas características relativas a argamassas de cal aérea, pretendeu-se avaliar qual o comportamento de uma argamassa só com este ligante face à contaminação biológica. Da mesma forma pretendeu-se avaliar alterações que pudessem ocorrer quando formulada uma argamassa na qual 25% da massa de cal fosse substituída por terra argilosa. Finalmente pretendeu-se avaliar que alterações nessa suscetibilidade biológica seriam introduzidas ao adicionarem-se fibras naturais de três tipos diferentes a argamassas de cal e terra. A suscetibilidade biológica foi avaliada tendo em conta também a consistência das argamassas no estado fresco e as suas características mecânicas e ao nível de porosidade e massa volúmica.

2.1. Composição e amassadura

As argamassas realizadas têm como base uma argamassa de cal aérea e areia siliciosa ao traço volumétrico 1:2 (cal:areia), que se designa como CL2. As características da cal aérea e da areia utilizada podem ser consultadas em Gameiro *et al.* [16] e a granulometria da terra argilosa pode ser consultada em Faria *et al.* [10]. Nas restantes quatro argamassas, 25% da massa de cal aérea foi substituída por terra argilosa comercializada pela Sorgila e proveniente da zona da Redinha, Pombal. Em três dessas argamassas foram adicionadas diferentes fibras naturais. As fibras naturais utilizadas são casca de arroz, crina de cavalo cortada com dimensões de 1-2 cm e resíduo de lã. Cada um dos tipos de fibras foi adicionado em percentagem elevada (na correspondência da massa da cal) e distinta dos restantes. Uma vez que a baridade das fibras era também distinta, os volumes incorporados eram também bastante diferentes. As percentagens elevadas de fibras foram definidas de modo a permitir obter argamassas manualmente consideradas como trabalháveis. As percentagens mássicas de fibras naturais utilizadas, face à massa de cal, foram de 9% de casca de arroz (argamassa CL2-25t+9ca), 5% de crina de cavalo (argamassa CL2-25t+5cc) e 2% de resíduo de lã (argamassa CL2-25t+2rl). As fibras naturais foram disponibilizadas por uma fábrica de descasque de arroz, por um picadeiro e por uma fábrica de lavagem e fiação de lã, respetivamente.

As denominações de cada argamassa, bem como uma breve descrição da sua composição encontram-se na Tabela 1.

Tabela 1. Denominação e composição das diferentes argamassas

Denominação	Composição
CL2	Cal aérea e areia ao traço volumétrico 1:2
CL2-25t	Cal aérea e areia ao traço volumétrico 1:2 mas com 25% de massa de cal substituída por terra
CL2-25t+9ca	Idem à anterior mas com adição de 9% de casca de arroz, face à massa de cal
CL2-25t+5cc	Idem à anterior mas com adição de 5% de crina de cavalo
CL2-25t+2rl	Idem às duas anteriores mas com adição de 2% de resíduo de lã

O material seco de cada argamassa foi pesado e homogeneizado na cuba da misturadora mecânica de laboratório. A quantidade de água que se considerou necessária para obter uma boa trabalhabilidade foi introduzida nos segundos iniciais da mistura mecânica. A mistura mecânica prolongou-se por 3 minutos, com uma interrupção de 30 segundos para reintegração do material nos bordos da cuba.

O traço em massa e a relação mássica entre a água e o material seco das argamassas encontram-se na Tabela 2.

Tabela 2. Composição (traço em massa e relação água/material seco) e consistência das argamassas

Argamassa	Traço em massa (cal:terra:areia:fibra)	Água/Mat.seco [-]	Consistência [mm]
CL2	1 : 0 : 7.7 : 0	0,20	146,6
CL2-25t	1 : 0.3 : 10.3 : 0	0,20	147,1
CL2-25t+9ca	1 : 0.3 : 10.3 : 0.09	0,23	142,5
CL2-25t+5cc	1 : 0.3 : 10.3 : 0.05	0,23	144,3
CL2-25t+2rl	1 : 0.3 : 10.3 : 0.02	0,26	154,8

2.2. Ensaio de consistência por espalhamento, provetes e cura

De modo a quantificar a trabalhabilidade e a consistência de cada argamassa realizada efetuou-se o ensaio de consistência por espalhamento. Este ensaio teve por base a norma EN 1015-3 [17]. Para o tipo de

argamassa em estudo (com base em cal aérea, em que a água não é necessária para hidratação), considerou-se trabalhável uma argamassa que obtivesse valores na ordem dos 150 ± 10 mm.

O ensaio consistiu em encher um molde tronco-cônico com argamassa fresca em duas camadas compactando a argamassa, com o auxílio de um pilão, um mínimo de 10 vezes por camada, rasurando-se o material em excesso. Em seguida, na mesa de espalhamento, o molde é retirado e a argamassa é submetida a 15 pancadas em 15 segundos. Em seguida, com o auxílio de uma craveira, são medidos dois diâmetros perpendiculares entre si e é feita a média entre eles. Os valores médios obtidos são apresentados na Tabela 2.

Foram executados três provetes prismáticos em moldes metálicos de $40 \times 40 \times 160$ [mm], preenchidos em duas camadas que foram compactadas mecanicamente, e nivelados. Ficaram em cura a $20 \pm 2^\circ\text{C}$ e 65% de umidade relativa, tendo a superfície livre dos provetes sido aspergida diariamente com água do 2º ao 5º dia. Foram desmoldados ao fim de 7 dias e mantidos nas mesmas condições de cura até aos 90 dias de idade.

2.3. Massa volúmica, resistências mecânicas e porosidade aberta

Aos 90 dias de idade os três provetes de cada argamassa foram pesados numa balança com precisão de 0,001g e medidos com uma craveira digital, determinando-se a respetiva massa volúmica no estado endurecido e apenas por método geométrico.

Os provetes de cada argamassa foram ensaiados à tração por flexão por três pontos, de acordo com a EN 1015-11 [18], através de uma máquina universal de tração Zwick Rowell com uma célula de carga de 2kN. As metades dos provetes resultantes da flexão foram sujeitas a ensaio de compressão no mesmo equipamento mas com uma célula de carga de 50kN, com base na mesma norma.

O topo íntegro de cada provete ensaiado foi então submetido ao ensaio de determinação de porosidade aberta, com base na norma NP EN 1936 [19] definida para ensaio de pedra natural, por vácuo e pesagem hidrostática. Como se optou por efetuar cada fase do ensaio durante 24 horas, ao longo deste ensaio os provetes permaneceram 48 horas imersos em água. Esta situação, mais exigente que em situações reais, pôde conduzir a alguma lavagem do ligante das argamassas, que se transferiu para a água.

Apresentam-se na Tabela 3 os valores médios obtidos da massa volúmica no estado endurecido, das resistências à tração por flexão e à compressão e da porosidade aberta das argamassas.

Tabela 3. Massa volúmica, resistências à tração e à compressão e porosidade aberta das argamassas

Argamassa	MV [kg/m ³]	Rt [N/mm ²]	Rc [N/mm ²]	Pab [%]
CL2	1594	0.33	0.70	29
CL2-25t	1576	0.31	0.57	30
CL2-25t+9ca	1437	0.20	0.44	34
CL2-25t+5cc	1444	0.22	0.51	33
CL2-25t+2rl	1579	0.25	0.60	31

2.4. Ensaio de contaminação biológica

Para o ensaio de contaminação biológica, que deve ser considerado preliminar, foram utilizados os provetes resultantes do ensaio de porosidade aberta, que estiveram 48 horas imersos em água, secos ao ar, condicionados em laboratório e posteriormente cortados em pequenos blocos com aproximadamente 4×4 [cm] de área superficial. Foram ensaiados três provetes por variável, exceto no caso da argamassa com casca de arroz em que só foi possível obter dois provetes.

Para avaliar a resistência à contaminação biológica por bolores seguiu-se uma metodologia adaptada da Norma Americana ASTM D 5590-00 [20] (Figura1) e já aplicada anteriormente com sucesso neste tipo de avaliação [21].



Figura 1. Alguns provetes no ensaio de contaminação biológica

Como material biológico foi utilizada uma cultura pura de *Aspergillus niger* mantida na coleção do LNEC. A viabilidade da suspensão de esporos foi verificada em 3 provetes de papel de filtro Whatman nº 1 que serviram de controlo.

Os provetes foram mantidos durante 4 semanas em ambiente condicionado ($22 \pm 1^\circ\text{C}$ de temperatura e $70 \pm 5\%$ de humidade relativa do ar) sendo o desenvolvimento dos fungos na superfície dos provetes avaliado todas as semanas, de acordo com a seguinte escala: 0 = sem crescimento; 1 = menos de 10% da superfície de provete; 2 = 10 a 30%; 3 = 30 a 60%; 4 \geq 60%.

3. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Na Figura 2, que apresenta a consistência por espalhamento face à relação água/material seco das argamassas, verifica-se que a substituição de 25% de cal aérea por massa equivalente de terra não altera significativamente a consistência da argamassa. No entanto, a adição de fibras à argamassa de cal e terra produz uma variação evidente na consistência. Quando se adicionou casca de arroz e crina de cavalo, a consistência diminuiu, mesmo com um acréscimo da relação água/material seco; no caso da adição de resíduo de lã, a argamassa aparentou necessitar de maior quantidade de água mas depois obteve um acréscimo da consistência, comparativamente a todas as outras argamassas e particularmente às argamassas com outras fibras naturais.

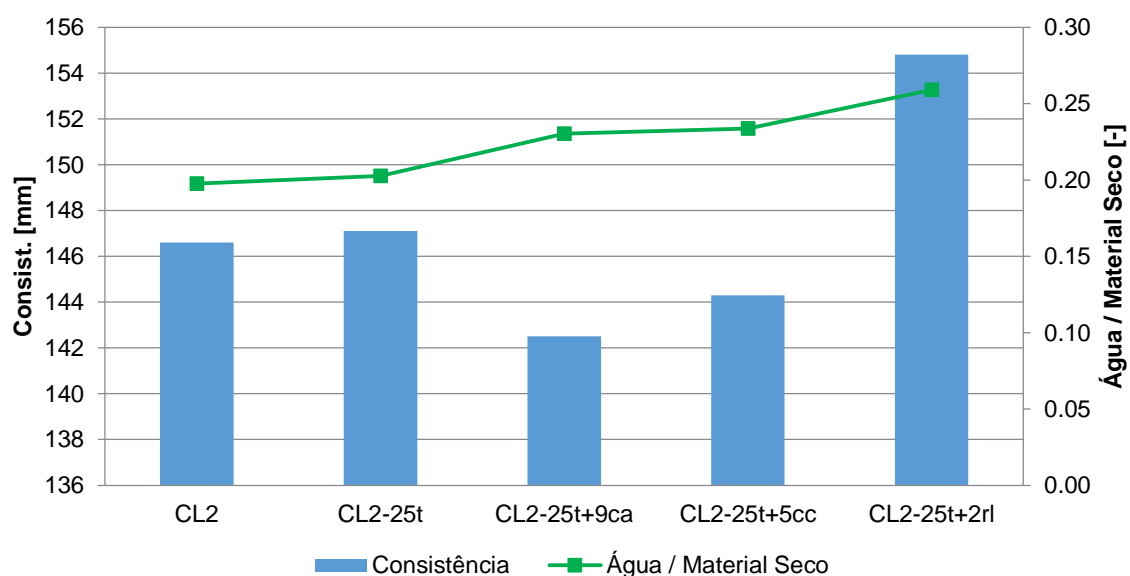


Figura 2. Consistência por espalhamento e relação mássica água/material seco das argamassas

A Figura 3 regista os valores das resistências à tração por flexão e à compressão das argamassas, aos 90 dias de idade. Constatase que as argamassas apresentam a mesma tendência relativamente às resistências à tração e à compressão. Verifica-se que a substituição de 25% de massa de cal por terra na argamassa diminui as resistências à tração por flexão e à compressão, sendo essa diminuição mais notória no segundo caso. Em relação às argamassas com adição de fibras, é possível observar que apenas o resíduo de lã melhora a resistência à compressão quando comparado com a argamassa de cal e terra sem fibras. Nas restantes duas argamassas ocorre uma diminuição das resistências à tração por flexão e à compressão, sendo que a argamassa com pior desempenho é a com adição de casca de arroz. Chamando a atenção para o facto da argamassa com resíduo de lã ter sido formulada com uma maior relação água/material seco, que conduziu a uma consistência por espalhamento superior às restantes, como hipótese pode admitir-se que talvez as suas características mecânicas possam ser ainda otimizadas com uma formulação com uma quantidade de água ligeiramente menor.

Comparando as resistências mecânicas aos 90 dias das argamassas analisadas com a gama de valores recomendada por Veiga *et al.* [5] para argamassas para edifícios antigos (ou alvenarias com características mecânicas semelhantes), verifica-se que todas as argamassas analisadas apresentam-se dentro dessa gama, deste ponto de vista.

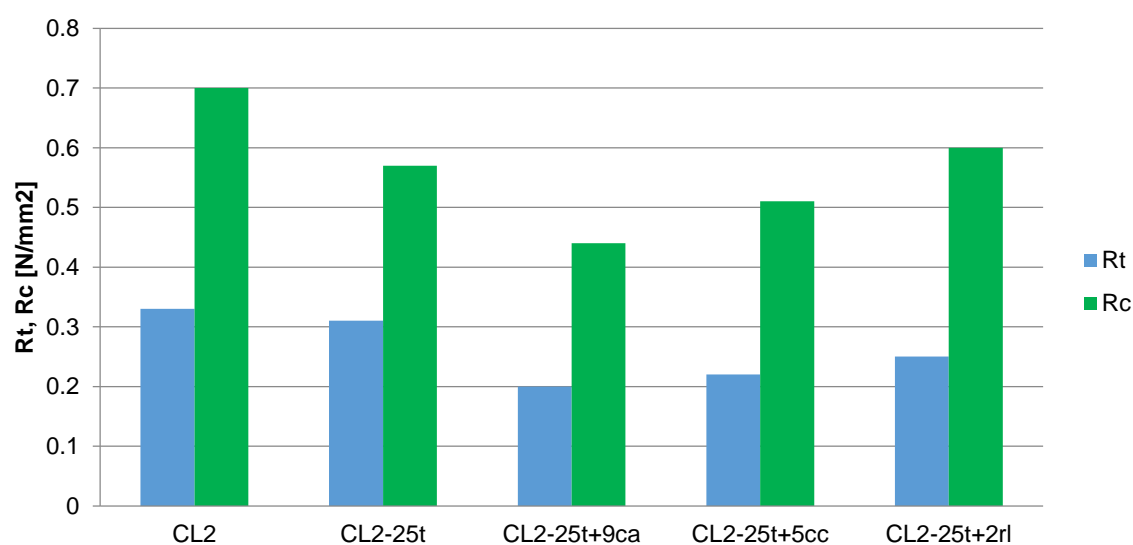


Figura 3. Resistências à tração por flexão e à compressão das argamassas

A Figura 4 apresenta a massa volúmica e a porosidade aberta das argamassas.

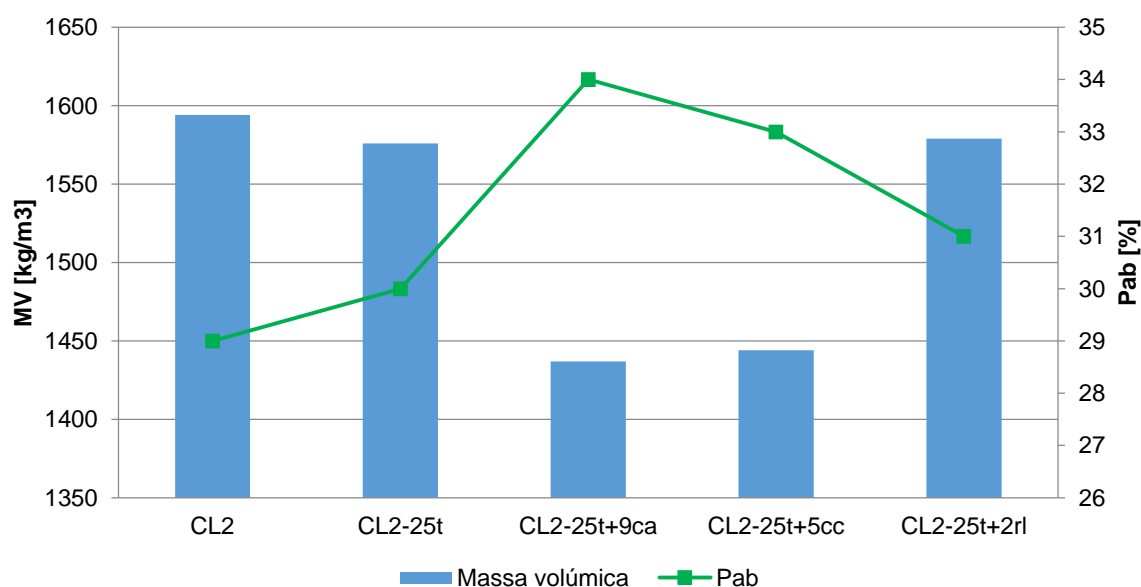


Figura 4. Massa volúmica e porosidade aberta das argamassas

Embora a massa volúmica e a porosidade aberta tenham sido determinadas por dois métodos distintos - o primeiro apenas com base na geometria exterior, enquanto o segundo considerando obviamente a microestrutura interna – pela Figura 4 observa-se que as argamassas apresentam tendências inversas face a estas duas características. Consta-se que apenas as argamassas com inclusão de casca de arroz e crina de cavalo apresentam variações acentuadas no que diz respeito à massa volúmica. Para as restantes argamassas, a massa volúmica mantém-se aproximadamente constante - apenas com uma ligeira diminuição com a substituição de cal por terra e por terra com adição de resíduo de lã. Relativamente à porosidade aberta, quando comparada com os valores da argamassa de referência ocorre um aumento em todas as argamassas. Este é mais acentuado na presença de fibras, nomeadamente na presença de crina de cavalo e, particularmente, de casca de arroz.

Comparando as Figuras 3 e 4 verifica-se que as resistências mecânicas apresentam uma tendência semelhante à registada pela massa volúmica (e inversa à da porosidade aberta), pelo que se demonstra a relação entre todas estas características.

No que diz respeito aos ensaios de contaminação biológica, a Figura 5 apresenta os resultados obtidos para as argamassas em estudo e para os provetes de controlo. Nestes provetes o crescimento do fungo foi intenso, quer sobre o papel de filtro, quer sobre o meio de cultura, permitindo assim a validação do ensaio.

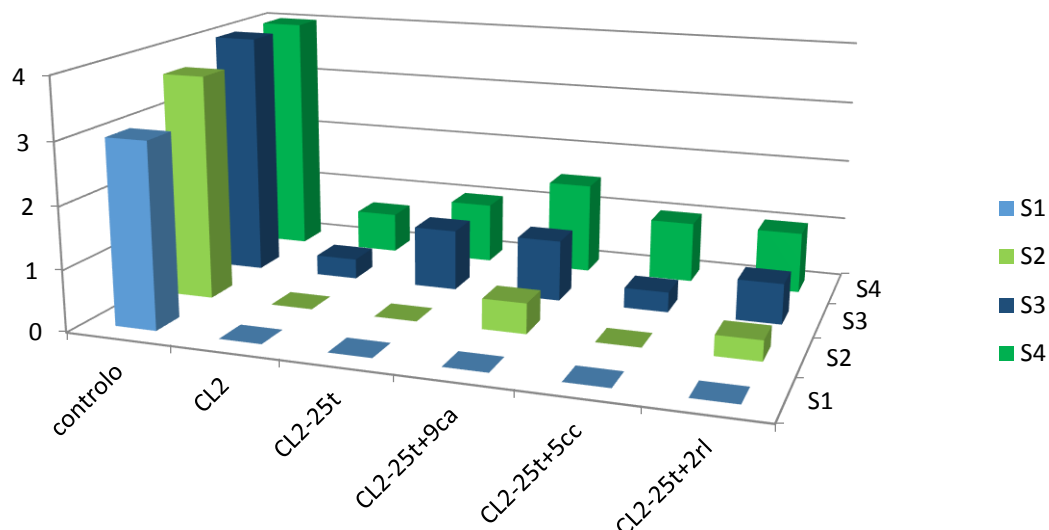


Figura 5. Resultados do ensaio de contaminação biológica

Qualquer das argamassas estudadas apresentou alguma resistência ao desenvolvimento de *Aspergillus niger*. De registar que ao fim de uma semana de ensaio nenhum dos provetes das diferentes argamassas apresentava ainda sinais de contaminação, estando já nessa altura o fungo bem instalado no meio de cultura e apresentando todos os provetes de controlo um grau 3.

Com o decorrer do ensaio foi possível verificar algumas pequenas diferenças entre as várias argamassas. Mas o reduzido número de provetes ensaiados (em particular de CL2-25t+9ca) reforça o carácter preliminar do ensaio.

Quando se compara a argamassa de referência (CL2) com a argamassa onde foi adicionada terra, observa-se que essa adição parece não aumentar significativamente a percentagem de contaminação, mantendo-se inferior a 10%. Contudo neste caso todos os provetes apresentam indícios de fungos.

A adição de fibras naturais às argamassas resultou num pequeno incremento no desenvolvimento do fungo, atingindo valores entre 10 e 30% em alguns dos provetes

A adição de crina de cavalo à argamassa conduz a resultados diferentes para os três provetes ensaiados sendo que num caso se obtém até 30% da superfície contaminada e noutro caso não apresenta indícios de contaminação. Admite-se que a maior dificuldade de homogeneizar estas fibras na argamassa possa

explicar parcialmente este resultado.

Face aos resultados e com a limitação já referida do número de provetes, pode-se admitir que a adição mais desfavorável em termos de colonização biológica seja a que inclui terra e casca de arroz. Os dois provetes apresentaram sinais de contaminação, sendo que um deles apresentou o maior grau de desenvolvimento de todo os provetes de argamassa.

Na Figura 6 é apresentado o aspeto final dos provetes de dois tipos de argamassas, CL2-25t+5cc e CL2-25t+2r, no final do ensaio. De notar que, quer a presença da lâ, quer da crina é bem evidente.

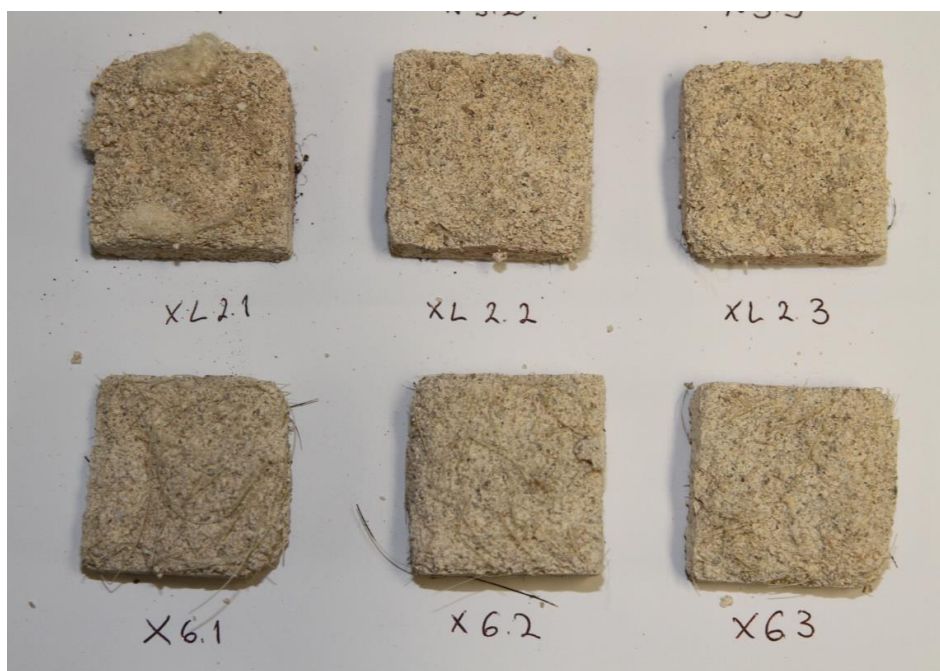


Figura 6. Provetes CL2-25t+5cc e CL2-25t+2r no final do ensaio

Analisando os resultados dos ensaios de contaminação biológica em paralelo com os resultados dos ensaios mecânicos e físicos, regista-se que as argamassas com fibras de casca de arroz e crina de cavalo têm em comum valores mais elevados de contaminação e porosidade aberta e valores mais baixos de massa volúmica e resistência à tração e compressão.

4. CONCLUSÕES

Considerando as limitações do ensaio de contaminação biológica e as condições de ensaio utilizadas, verificou-se que o desenvolvimento do bolor *Aspergillus niger* na superfície das argamassas é relativamente limitado, embora a adição de fibras naturais possa levar a um aumento dos níveis de contaminação.

O desenvolvimento limitado do fungo pode ser explicado, por exemplo, pelos valores do pH que se admite que os provetes tenham. Enquanto, no caso de argamassas de cal aérea, uma argamassa após carbonatação baixa o pH de 12.5 para valores próximos de 9 [22], as argamassas comerciais de terra apresentam um pH próximo de 8 [23]. Tal como foi referido anteriormente, para que ocorra contaminação é essencial, entre outros fatores, que o pH do provete se encontre abaixo de 9. Assim, devido ao elevado pH apresentado pela cal aérea, o desenvolvimento do bolor pode ter sido, favoravelmente, inibido.

No caso das argamassas que registaram maior presença de fungos foi possível identificar que eram também as que apresentavam valores mais elevados de porosidade aberta. Este facto permite concluir que, ao contrário do referido em alguns estudos [14][15], a porosidade parece influenciar a disposição à contaminação por bolores.

Nesta fase do estudo pretendeu-se avaliar as características que volumes elevados de fibras naturais introduziam nas argamassas. Em estudos subsequentes, e uma vez despistado que a sua introdução não parece traduzir-se em problemas significativos ao nível da contaminação biológica, vai então proceder-se à otimização dessas argamassas em termos de composição e também efetuar-se caracterização complementar.

AGRADECIMENTOS

Agradece-se à Fundação para a Ciência e a Tecnologia pelo financiamento ao projeto EXPL/ECM-COM/0928/2012. São ainda devidos agradecimentos à Lusical pela disponibilização da cal aérea H100, à Doutora Idália Gomes e à Sorgila pela terra argilosa, à Inês Dias pela casca de arroz, à Catarina Pereira pela crina de cavalo e à Multilã pelo resíduo de lã.

REFERÊNCIAS

- [1] R. Veiga e P. Faria, “Revestimentos de ligantes minerais e mistos com base em cimento, cal e resina sintética”, in *Curso de Especialização sobre Revestimentos de Paredes. 1º Módulo*. Lisboa, LNEC, 1990, pp. 40-173.
- [2] IPQ, NP EN 998-1: 2013, “Especificação de argamasas para alvenarias. Parte 1: Argamasas para revocos interiores e exteriores”, Caparica.
- [3] P. Faria, F. Henriques e V. Rato, “Comparative evaluation of lime mortars for architectural conservation”. *Journal of Cultural Heritage*, vol. 9, pp. 338-346, 2008.
- [4] IPQ, NP EN 459-1: 2011, “Cal de construção. Parte 1: Definições, especificações e criterios de conformidade”, Caparica.
- [5] R. Veiga, A. Fragata, A. Velosa, A. Magalhães e G. Margalha, “Lime-based mortars: viability for use as substitution renders in historical buildings” *International Journal of Architectural Heritage*, vol. 4, pp. 177-195, 2010.
- [6] M. I. Gomes e P. Faria, “Repair mortars for rammed earth constructions”, in *XII DBMC – 12th International Conference on Durability of Building Materials and Components*, Vol.2, V.P Freitas, H.Corvacho, M.Lacasse (eds.), Porto, FEUP, 2011, pp.689-696
- [7] M. I. Gomes, T. Gonçalves e P. Faria, “Earth-based repair mortars: experimental analysis with different binders and natural fibers”, *Rammed Earth Conservation*, Mileto, Vegas & Cristini (eds.), Taylor & Francis Group, London, 2012, pp. 661-668.
- [8] P. Faria, T. Santos e V. Silva, “A Portuguese premixed earth-based mortar for eco-efficient plasters”, *International Conference on Vernacular Heritage, Sustainability and Earthen Architecture, VerSus 2014, 2nd MEDITERRA, 2nd ResTAPIA*, Valencia, Spain, 11-13 September, 2014 (aceite para publicação).
- [9] P. Faria, T. Santos e V. Silva, “Earth-based mortars for masonry plastering”, *9th International Masonry Conference*, 7-9 July 2014, Univ. Minho, Guimarães, 2014 (aceite para publicação).
- [10] P. Faria, V. Silva, N. Jamú, I. Dias e I. Gomes, “Evaluation of air lime and clayish earth mortars for earthen wall renders”, *Vernacular Heritage and Earthen Architecture: Contributions for Sustainable Development*, M. Correia, G. Carlos, S. Rocha (eds.), CRC Press / Taylor & Francis Group, 2013, pp. 407-413.
- [11] M. I. Gomes, T. Gonçalves e P. Faria, “The compatibility of earth-based repair mortars with rammed earth substrates”, *HMC2013 – Historic Mortars Conference, University of West Scotland*, Glasgow, Sept 2013 (CD).
- [12] U. Rohlen, “Mould on Clay Renders”, in *6th International Conference on Building with Earth, LEHM 2012*, Weimar, Germany, 5-7 October, Dachverband Lehm e.V., 2012, pp. 113-121.
- [13] D. Giannantonio, J. Kurth, K. Kurtis e P. Sobecky, “Effects of concrete properties and nutrients on fungal colonization and fouling”, *International Biodeterioration & Biodegradation*, vol. 63, pp. 252-259, 2009.
- [14] M. Shirakawa, I. Beech, R. Tapper, M. Cincotto e W. Gambale, “The development of a method to evaluate bioreceptivity of indoor mortar plastering to fungal growth”. *International Biodeterioration & Biodegradation*, vol. 51, pp. 83-92, 2003.
- [15] T. Tran, A. Govin, R. Guyonnet, P. Grosseau, C. Lors, E. Garcia-Diaz, D. Damidot, O. Devès e B. Ruot, “Influence of the intrinsic characteristics of mortars on biofouling by *Klebsormidium flaccidum*”. *International Biodeterioration & Biodegradation*, vol. 70, pp. 31-39, 2013.
- [16] A. Gameiro, A. Santos-Silva, P. Faria, J. Grilo, T. Branco, R. Veiga e A. Velosa, “Physical and chemical assessment of air lime-metakaolin mortars: Influence of binder:aggregate ratio”, *Cement*

and Concrete Composites, vol. 45, pp. 264-271, 2014.

- [17] CEN, EN 1015-11:1999, "Methods of test for mortar for masonry. Determination of consistence of fresh mortar (by flow table)". Brussels.
- [18] CEN, EN 1015-11:1999, "Methods of test for mortar for masonry. Part 11: Determination of flexural and compressive strength of hardened mortar". Brussels.
- [19] IPQ, NP EN 1936:2008, "Métodos de ensaio para pedra natural. Determinação das massas volúmicas real e aparente e das porosidades total e aberta". Caparica.
- [20] ASTM, ASTM 5590: 2000, "Determining the resistance of paint films and related coatings to fungal defacement by accelerated four-week agar plate assay", *ASTM International*, Pennsylvania, USA.
- [21] M. Martins, L. Nunes e F. Branco, "Plastering and rendering mortars incorporating regranulated of expanded cork to improve durability", in *XII DBMC - 12th International Conference on Durability of Building Materials and Components*, vol. III, V. Peixoto de Freitas, H. Corvacho, M. Lacasse (eds.), Porto, FEUP, 2011, pp. 1361-1368.
- [22] P. Faria, "Argamassas de revestimento para alvenarias antigas". Tese de Doutoramento em Engenharia Civil – Reabilitação do Património Edificado. Universidade Nova de Lisboa, 2004.
- [23] C. Galán-Marín, C. Rivera-Gómez e J. Petric, "Clay-based composite stabilized with natural polymer and fibre", *Construction and Building Materials*, vol. 2